अध्याय–17
विद्युत चुंबकीय तरंगे संचार एवं समकालीन भौतिकी
(Electro Magnetic Waves, Communication and Contemporary Physics)

विद्युत चुंबकीय तरंगे हमारे वातावरण में विभिन्न रूपों में विद्यमान है तथापि कई बार हम इनकी उपस्थिति से अनभिज्ञ होते हैं। प्रकाश के रूप में विद्युत चुंबकीय तरंगे हमें आसपास की दुनिया देखने में सहायक होती हैं तो अवरक्त तरंगे वातावरण को गर्म रखती हैं। सूक्ष्म तरंगें (microwaves) जहाँ रसोई घरों में भोजन पकाने में मदद करती है वहीं संचार के क्षेत्र में राडार तथा मोबाईल फोन में भी भूमिका निर्वहन करती है।

इस अध्याय में हमारा एक उद्देश्य विद्युत चुंबकीय तरंगों की प्रकृति एवं इसके गुणधर्मों का अध्ययन है। विद्युत चुंबकत्व के मूल नियम–मैक्सवेल समीकरणें सभी चिरसम्मत विद्युत चुम्बकीय परिघटनाओं के सैद्धांतिक स्पष्टीकरण का आधार है। इन समीकरणों की चिरसम्मत विद्युत चुम्बकत्व में ठीक उतनी ही महत्वपूर्ण भूमिका है जैसे यान्त्रिकी में न्यूटन के नियमों की हैं परन्तु गणितीय दृष्टि से मैक्सवेल समीकरणों को अंधिकाश अनुप्रयोगों संबन्धी समस्याओं को हल करने में जटिलता होती है। इनका विशद गणितीय विवेचन हमारे अध्ययन की परिसीमा से परे होने के कारण आगामी अनुभागों में इनके गुणात्मक विवेचन तक सीमित रहते हुए विद्युत चुंबकीय तरंगो के संचरण, इनके अभिलक्षणों इत्यादि की जानकारी प्राप्त करेंगे।

आधुनिक संचार क्षेत्र के मूल में विद्युत चुबंकीय तरंगे ही हैं। अतः हम संचार के क्षेत्र में काम आने वाली विभिन्न विद्युत चुबंकीय तरंगों एवं संचार तंत्र के मूल अवयवों का भी अध्ययन करेंगे।

जैसा भौतिक विज्ञान का इतिहास बताता है भौतिकी में निरन्तर नवीन खोजें एवं नवीन सिद्धान्त अध्ययन के कई नए क्षेत्रों को विकसित करता हैं। पिछले तीन दशकों में नैनो भौतिकी के रूप में भौतिक विज्ञान की एक नई शाखा का उद्गम हुआ है। इस अध्ययन क्षेत्र की वस्तुएँ नैनोमीटर के आकार की होने के कारण इनके गुणों के सैद्धांतिक पक्ष की व्याख्या में क्वाटंम यांत्रिकी का सीधा दखल है। गुणों की सही व्याख्या से जहाँ क्वाटंम भौतिकी को सीधा सैद्धान्तिक समर्थन मिलता है वहीं इनके कई तकनीकी उपयोग हमारे दैनिक जीवन में क्रांतिकारी परिवर्तन ला रहे हैं– उदाहरणार्थ आप कल्पना करें कि आपके पास ऐसे वस्त्र हों जो गर्मी में आपको शीतलता का अनुभव कराए तथा सर्दी में गर्माहट का तो हमारा जीवन कितना सुखद हो जाएगा। नैनो भौतिकी के अनुप्रयोगों से ऐसा संभव है, स्थूल रूप में सोना आपको पीला दिखता है किन्तु नैनो डॉट के रूप में उपस्थित सोना लाल दिखता हैं। (पुराने कैथेडलो के लगे काँचो में कई जगह ऐसी लाल बिंदियाँ दिखना यह दर्शाता है कि प्राचीन काल में भी लोग ऐसे अनुप्रयोगों से परिचित थे।) इस अध्याय के अंत में हमारा प्रयास आपको नैनो भौतिकी के उद्गम तथा मूल विचारों से परिचित करवाना हैं, हो सकता है कि आप में से कुछ आगे जाकर इस क्षेत्र में रूचि लें तथा विज्ञान जगत एवं मानवता की सेवा कर सकें।

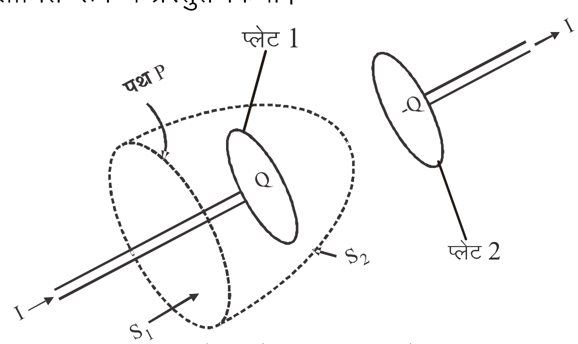
17.1 विस्थापन धारा (Displacement Current)

अध्याय 7 में हम देख चुके हैं कि गतिमान आवेश या धाराएँ चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करते हैं। जब किसी धारावाही चालक में उच्च सममितता होती है तो चुंबकीय क्षेत्र को ऐम्पियर नियम

$$\int \vec{B}\cdot d\vec{\ell} = \mu_o I \qquad \ldots (17.1)$$

से दिया जाता है। जहाँ रेखीय समाकल किसी भी ऐसे बंद पथ के अनुदिश है जिसमें चालन धारा(conduction current) गुजरती है तथा चालन धारा $I = dq/dt$ से दी जाती है।

इस अनुभाग में हम चालक तारों में आवेश प्रवाह के कारण प्रवाहित धारा को चालन धारा से संबंधित कर रहे है। ताकि इसे एक अन्य धारा से विभेदित किया जा सके जिससे हम आगे इसी अनुभाग में परिचित होने वाले है। एम्पियर नियम का ऊपर दिया गया रूप केवल तब ही वैध है जब चालन धारा व्योम में संतत है, मैक्सवेल ने इस सीमाबंधन को पहचान करते हुए सभी संभव परिस्थितियों को सम्मिलित करने हेतु ऐम्पियर नियम को संशोधित रूप में प्रस्तुत किया।



चित्र 17.1 संधारित्र को आवेशन प्रक्रिया में चालन धारा I एवं सतह S_1 एवं S_2

धारा के संतत न होने पर होने वाली समस्या को समझने के लिए हम एक संधारित्र पर विचार करते हैं जो कि आवेशित किया जा रहा है। (चित्र 17.1) आवेशन की प्रक्रिया में प्लेट 1 पर जुड़े चालक तार में चालन धारा I भीतर जा रही हैं जबकि प्लेट 2 पर जुड़े चालक तार से चालन धारा I बाहर आ रही है। जब तारों में चालन धारा प्रवाहित हो रही है तब संधारित्र की प्लेटों पर आवेश परिवर्तित हो रहा है किन्तु प्लेटों के मध्य के क्षेत्र में जहाँ निर्वात है कोई चालन धारा नहीं है स्पष्ट है कि यहाँ चालन धारा में असंततता है। अब दो सतहों की कल्पना करें इनमें से एक

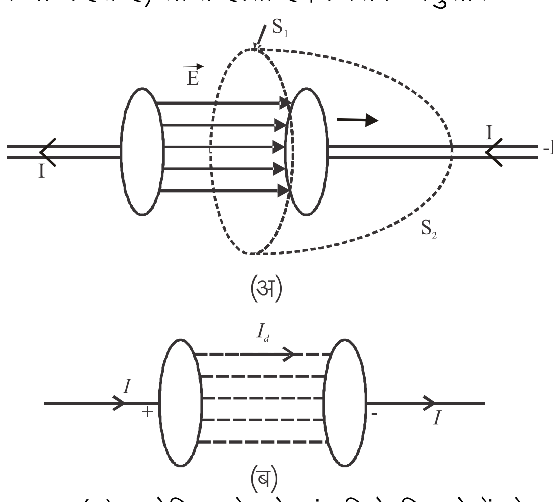
सतह S_1 वृत्ताकार है तथा दूसरी सतह S_2 परवलयज (Paraboloidal) है जो दोनों प्लेटों के बीच में से गुजर रही है। ध्यान दें कि दोनों सतहें समान बंद पथ P द्वारा परिबद्व हैं। अब यदि इस पथ पर एम्पियर नियम प्रयुक्त किया जाए तो इस पथ के अनुदिश $\int \vec{B}\cdot d\vec{\ell}$ का मान $\mu_0 I$ होना चाहिए जहाँ I बंद पथ P द्वारा परिबद्व किसी भी सतह से गुजरने वाली धारा है।

जब पथ P को सतह S_1 को परिबद्ध करता हुआ माना जाए तो $\int \vec{B}\cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I$ होगा क्योंकि संधारित्र के आवेशन के कारण S_1 से चालन धारा I गुजर रही है। यदि पथ P को सतह S_2 को परिबद्ध करता हुआ मानें तो उपर्युक्त समाकल का मान शून्य होगा क्योंकि S_2 में कोई चालन धारा नही गुजर रही है। इस प्रकार धारा की असंततता के कारण एक विरोधाभासी स्थिति उत्पन्न हो रही है। इस विरोधाभास को हल करने के लिए मैक्सवेल ने प्रतिपादित किया कि चालक प्लेटों के मध्य रिक्त स्थान में एक अन्य प्रकार की धारा जिसे विस्थापन धारा (displacement current) I_d कहा जाता है, का अस्तित्व होना चाहिए। परिभाषा से

$$I_d = \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} \qquad \ldots (17.2)$$

जहाँ ϕ_E विद्युत क्षेत्र का फ्लक्स है।

जब संधारित्र आवेशित (या निरावेशित) हो रहा है तो प्लेटों पर आवेश परिवर्तन के कारण प्लेटों के मध्य परिवर्तनशील विद्युत क्षेत्र को एक धारा से संबद्ध माना जा सकता है जो कि तारों में प्रवाहित धारा के साथ सांतत्य में है। जब समीकरण 17.2 द्वारा दिये जाने वाली विस्थापन धारा को समीकरण 17.1 के दक्षिण पक्ष में उपस्थित चालन धारा पद के साथ योग किया जाए तो चित्र 17.1 की परिस्थिति द्वारा उत्पन्न विरोधाभास समाप्त हो जाता है। अब हम जब P द्वारा परिबद्ध कोई भी सतह क्यों ना ले ले इसमें से या तो चालन धारा अथवा विस्थापन धारा प्रवाहित होगी। विस्थापन धारा को सम्मिलित किए जाने के उपरान्त हमें संशोधित एम्पियर नियम (जिसे मैक्सवेल–ऐम्पियर नियम भी कहते है) प्राप्त होता है। जिसके अनुसार



चित्र 17.2 (अ) आवेशित हो रहे संधारित्रो कि प्लेटों के मध्य विद्युत क्षेत्र (ब) संधारित्र के मध्य विस्थापन धारा

$$\int \vec{B}\cdot d\vec{\ell} = \mu_0 (I + I_d) = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$$

राशि $\varepsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$ की विमाएँ धारा की हैं। धारा के सांतत्य के लिए न केवल विस्थापन धारा का अस्तित्व होना चाहिए अपितु इसे चालन धारा के यथार्थतः तुल्य भी होना चाहिए। यदि किसी क्षण संधारित्र की प्लेटों के मध्य विद्युत क्षेत्र E है तो जैसा चित्र 17.2 से स्पष्ट है सतह S_2 से गुजरने वाला विद्युत फ्लक्स $\phi_E = EA$ होगा जहाँ A संधारित्र की प्लेटों का क्षेत्रफल है यदि इस क्षण संधारित्र की प्लेट पर आवेश Q है तो

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A}$$

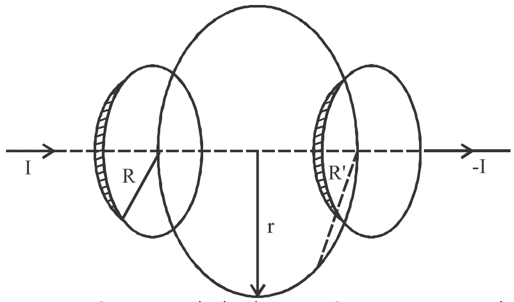
$$\therefore \qquad \phi_E = \frac{Q}{\epsilon_0 A} A = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\frac{d\phi_E}{dt} = \frac{1}{\epsilon_0}\frac{dQ}{dt}$$

या $$\epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} = \frac{dQ}{dt}$$

अतः $$I_d = I$$

इस प्रकार विस्थापन धारा यथार्थतः चालन धारा के तुल्य है। चालन धारा I आवेश प्रवाह के कारण है जबकि विस्थापन धारा I_d परिवर्ती विद्युत क्षेत्र के कारण है। चूँकि विद्युत क्षेत्र प्लेटों के मध्य एक समान वितरित हैं अतः विस्थापन धारा I_d भी इसी प्रकार वितरित होगी। चालन धारा अल्प मोटाई की चालक तार में प्रवाहित हैं तो विस्थापन धारा संधारित्र के प्लेट क्षेत्रफल के तुल्य क्षेत्रफल में वितरित है (चित्र 17.2 ब) विस्थापन धारा में शब्द विस्थापन यांत्रिकी में कण की स्थिति को व्यक्त किए जाने वाले विस्थापन से का कोई लेना देना नही है ऐसा पूर्व में प्रचलन के अनुसार अब भी किया जा रहा है। उपर्युक्त विवेचन का एक महत्वपूर्ण परिणाम यह है कि चुंबकीय क्षेत्र चालन तथा विस्थापन धाराओं दोनों द्वारा उत्पन्न हो सकते हैं। चूंकि विस्थापन धारा स्वंय परिवर्ती विद्युत क्षेत्र के कारण है, अतः यह भी कहा जा सकता है कि परिवर्ती विद्युत क्षेत्र चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न करते हैं। यह प्रकृति में सममितता के परिपेक्ष्य से भी महत्वपूर्ण है (प्रकृति की एक सममितता का उदाहरण हम पूर्व में द्रव्य–तरंग व्यवहार में देख चुके हैं।) फैराडे के विद्युत चुंबकीय प्रेरण नियम से हम जानते हैं कि एक परिवर्ती चुंबकीय क्षेत्र एक परिवर्ती विद्युत क्षेत्र उत्पन्न करता है। अतः यह प्रश्न उठना स्वाभाविक ही है कि क्या एक परिवर्ती विद्युत क्षेत्र एक चुंबकीय क्षेत्र उत्पन्न कर सकता हैं इसका उत्तर हम ऊपर देख चुके हैं। इसे निम्न प्रकार से और भी अधिक स्पष्ट किया जा सकता है।



चित्र 17.3 संधारित्र की प्लेटों के मध्य विस्थापन धारा के कारण चुंबकीय क्षेत्र की गणना

चित्र 17.3 में दर्शाए अनुसार एक वृत्ताकार समान्तर प्लेट संधारित्र पर विचार करें। अब हम संधारित्र के भीतर इसके केन्द्र से r दूरी पर चुंबकीय क्षेत्र का मान ज्ञात करते हैं। चूंकि संधारित्र के भीतर कोई चालन धारा नही है अतः चुंबकीय क्षेत्र विस्थापन धारा के कारण ही होना चाहिए तब संशोधित ऐम्पियर नियम से r त्रिज्या के लूप द्वारा बंद पथ हेतु

$$\int \vec{B}\cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_d = \mu_0 \in_0 \frac{d\phi_{\in}}{dt}$$

या $$B(2\pi r) = \mu_0 \in_0 A\frac{dE}{dt} \qquad [\phi_E = EA]$$

या $$B = \left(\frac{\mu_0 \in_0 \pi R^2}{2\pi r}\right)\frac{dE}{dt}$$

$$= \left(\frac{\mu_0 \in_0 R^2}{2r}\right)\frac{dE}{dt}$$

जिससे स्पष्ट है कि B की उत्पति dE/dt के ही कारण है

उदाहरण 17.1 10 F धारिता के एक समान्तर प्लेट संधारित्र को आवेशित करने की प्रक्रिया में इसे 50 V विभवान्तर तक पहुँचने में 50 सेकण्ड का समय लगता है। यदि संधारित्र का प्लेट क्षेत्रफल $10\times10^{-12}\ \text{m}^2$ है तो ज्ञात करो

(i) इस समय औसत चालन धारा

(ii) इस समय औसत विस्थापन धारा तथा

(iii) इस समय विद्युत क्षेत्र के समय के साथ परिवर्तन की दर

हलः (i) चालन धारा का औसत मान

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{q_2 - q_1}{t_2 - t_1} = \frac{CV - 0}{0.5} = \frac{10\times10^{-6}\times50}{0.5}$$

$$= 10^{-3}\ \text{A}$$

(ii) संधारित्र में औसत विस्थापन धारा = संधारित्र में प्रवेश कर रही चालन धारा $I_d = I = 10^{-3}\ \text{A}$

(iii) चूँकि $I_d = \in_0 A\dfrac{dE}{dt}$

$$\therefore \qquad \frac{dE}{dt} = \frac{I_d}{\in_0 A} = \frac{10^{-3}}{8.85\times10^{-12}(10\times10^{-12})}$$

$$= 1.1\times10^{9}\ \text{V/ms}$$

17.2 मैक्सवेल समीकरणें (गुणात्मक विवेचन) (Maxwell's Equation Qualitative Discussion)

इस अनुभाग में हम विद्युत चुंबकत्व के लिए चार मूल समीकरणें जिन्हें मैक्सवेल समीकरणें कहा जाता है प्रस्तुत कर रहे हैं। ये समीकरणें निम्नलिखित हैं

$$\int \vec{E}\cdot d\vec{A} = \frac{q}{\in_0} \qquad \ldots(17.3)$$

$$\int \vec{E}\cdot d\vec{A} = 0 \qquad \ldots(17.4)$$

$$\int \vec{E}\cdot d\vec{\ell} = \frac{-d\phi_B}{dt} \qquad \ldots(17.5)$$

$$\int \vec{E}\cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I + \mu_0 \in_0 \frac{d\phi_E}{dt} \qquad \ldots(17.6)$$

उपर्युक्त समीकरणें यह मानते हुए लिखी गई हैं कि कोई परावैद्युतीय अथवा चुम्बकीय माध्यम उपस्थित नहीं है।

समीकरण 17.3, स्थिर वैद्युतिकी के लिए गाऊस नियम है जिसके अनुसार किसी बंद पृष्ठ से निर्गत विद्युत फ्लक्स इस सतह में परिबद्ध नेट आवेश का $1/\in_0$ गुना होता है। यह कूलाम के व्युत्क्रम वर्ग नियम पर आधारित है। यह नियम बतलाता है कि विद्युत आवेश किस प्रकार विद्युत क्षेत्र उत्पन्न करते हैं जिनमें विद्युत क्षेत्र रेखाओं का उद्‌गम धनात्मक आवेशों पर तथा इनकी समाप्ति ऋणावेशों पर होती है।

समीकरण 17.4, जिसे चुम्बकत्व के लिए गाऊस नियम भी कहा जाता है, के अनुसार किसी बंद पृष्ठ से निर्गत नेट चुंबकीय फ्लक्स शून्य होता है। अर्थात किसी बंद आयतन में प्रवेश करने वाली चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ संख्या में आयतन से निर्गत चुंबकीय रेखाओं के बराबर होनी चाहिए। इसका यह आशय है कि चुंबकीय रेखाएँ किसी एक बिंदु पर प्रारंभ अथवा समाप्त नहीं होती। यदि ऐसा होता तो ऐसे बिन्दुओं पर एकल चुंबकीय ध्रुवों (magnetic monopoles) का अस्तित्व होता जिसके लिए कोई प्रायोगिक साक्ष्य उपलब्ध नहीं है।

समीकरण 17.5, फैराडे का विद्युत चुंबकीय प्रेरण नियम है जो यह बतलाता है कि किस प्रकार कोई परिवर्तनशील चुंबकीय क्षेत्र एक विद्युत क्षेत्र प्रेरित करता है। इस नियम के अनुसार किसी बंद पथ के अनुदिश विद्युत क्षेत्र का रेखीय समाकल (जो कि विद्युतवाहक बल होता है) इस बंद पथ द्वारा परिबद्ध किसी सतह से पारित चुंबकीय फ्लक्स की दर (के

ऋणात्मक) के बराबर होता है (सतह बंद नहीं है अतः सतह से निर्गत चुंबकीय फ्लक्स के लिए आवश्यक नही हैं कि यह शून्य हो)। इस प्रकार यह विद्युत क्षेत्र सदिश E को चुंबकीय क्षेत्र सदिश B के परिवर्तन की दर से भी संबंधित करता है।

समीकरण 17.6, मैक्सवेल ऐम्पीयर नियम हैं जिसके बारे में आप पिछले अनुभाग में पढ़ चुके है। इसके अनुसार किसी बंद पथ के अनुदिश चुंबकीय क्षेत्र का रेखीय समाकल इस पथ द्वारा परिबद्ध किसी सतह से पारित चालन धारा तथा सतह से पारित विद्युत फ्लक्स में परिवर्तन की दर के $\mu_o \in_0$ गुना का योग होता है। यह नियम व्याख्या करता है कि किस प्रकार किसी क्षेत्र को, जिसमें धारा प्रवाहित हो रही है या जिसमें विद्युत क्षेत्र परिवर्तित हो रहा है, चुंबकीय क्षेत्र रेखाएँ किस प्रकार घेरती है।

मैक्सवेल समीकरणों में उपस्थित सममितता पर ध्यान दे। समीकरण 17.4 में चुंबकीय एकल ध्रुव की अनुपस्थिति को छोड़ते हुए देखें तो समीकरण 17.3 व 17.4 सममित हैं। समीकरणें 17.5 व 17.6 इस प्रकार से सममित हैं कि इनमें किसी बंद पथ पर क्रमशः E व B के रेखीय समाकल क्रमशः चुंबकीय एवं विद्युत फ्लक्स के परिवर्तन की दर से संबधित है।

यदि किसी स्थान पर विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्र ज्ञात है तो उस स्थान पर किसी आवेश q पर बल $\vec{F} = q\vec{E} + q\left(\vec{v}\times\vec{B}\right)$ से ज्ञात किया जाकर तथा मैक्सवेल समीकरणों की सहायता से सभी चिरसम्मत वैद्युत चुंबकीय परिघटनाओं की व्याख्या की जा सकती है। मैक्सवेल समीकरणों का एक अन्य महत्वपूर्ण परिणाम विद्युत चुंबकीय तरंगों की उत्पत्ति की व्याख्या में है जिनके बारे में हम अगले अनुभाग में अध्ययन करेंगें। जैसा कि हम अध्याय के प्रारम्भ में वर्णित कर चुके हैं मैक्सवेल समीकरणों का विद्युत चुंबकत्व में वही स्थान है जो न्यूटन नियमों का यांत्रिकी में है पर यहाँ एक तथ्य महत्वपूर्ण यह है कि जहाँ न्यूटन के नियम आंइसटीन के आपेक्षिकता संबंधी अवधारणाओं के अनुरूप खरे नहीं उतरते हैं वहीं मैक्सवेल समीकरणें आपेक्षीय अवधारणाओं से पूर्णतया सांमजस्य में होती है।

17.3 विद्युत चुंबकीय तरंगे तथा इनके अभिलक्षण (Electro Magnetic Waves and their Characteristics)

मैक्सवेल समीकरणों का एक महत्वपूर्ण निष्कर्ष यह है कि परिवर्तनशील विद्युत एवं परिवर्तनशील चुंबकीय क्षेत्र एक दूसरे की उत्पत्ति कर सकते हैं। यह निष्कर्ष स्थापित करता है कि निर्वात में विद्युत चुबंकीय तरंग संचरण होना चाहिए। मैक्सवेल समीकरणों से यह भी ज्ञात किया जा सकता है कि एक त्वरित आवेश को विद्युत चुंबकीय तरंगे उत्सर्जित करनी चाहिए। इस तथ्य की गणितीय व्याख्या इस अध्ययन के स्तर पर अपेक्षित नही हैं। यहाँ हम गुणात्मक विवेचन से इस तथ्य को समझने का प्रयास करेंगे। यह तो हम जानते ही हैं कि विद्युत क्षेत्र अथवा चुंबकीय क्षेत्र की उत्पत्ति में आवेश एवं आवेश प्रवाह (विद्युत धारा) की भूमिका है तो आवेशों या धाराओं की कौन सी व्यवस्था विद्युत चुंबकीय तरंगों के लिए उत्तरदायी है? विरामावस्था में स्थित एक आवेश विद्युत क्षेत्र स्थापित करता है। नियत चाल से गतिमान आवेश (नियत धारा) विद्युत क्षेत्र के साथ साथ चुंबकीय क्षेत्र भी स्थापित करता है। इस प्रकार से स्थापित विद्युत क्षेत्र एवं चुम्बकीय क्षेत्रों के कारण व्योम में ऊर्जा घनत्व होता है किन्तु यह ऊर्जा घनत्व समय के साथ अपरिवर्तित रहता है। इस प्रकार की आवेश व्यवस्था के कारण दूरस्थ बिंदुओं तक किसी विक्षोभ का अभिगमन नहीं होता अर्थात ऊर्जा या संवेग स्थानांतरित नहीं होते तथा कोई विद्युत चुंबकीय तरंग संचारित नहीं होती। अब यदि आवेश त्वरित हो या तुल्य रूप में धारा परिवर्तनशील हो तो इस प्रकार की व्यवस्था एक परिवर्तनशील विद्युत क्षेत्र को जन्म देगी जो मैक्सवेल समीकरणों के अनुरूप परिवर्तनशील चुंबकीय क्षेत्र को उत्पन्न करेगी जो पुनः परिवर्तनशील विद्युत क्षेत्र की उत्पत्ति का कारण बनेगा। इस प्रकार से उत्पन्न विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्र एक दूसरे को संपोषित करेंगे अर्थात् विद्युत चुंबकीय तरंग की उत्पत्ति होगी। इस प्रकार की तरंगों को ऊर्जा त्वरित आवेश की ऊर्जा से ही प्राप्त होगी। कोई दोलनी आवेश भी त्वरित आवेश ही है अतः विभिन्न दोलनी विद्युत परिपथ ही कई प्रकार की विद्युत चुंबकीय तरंगों के प्रायोगिक उत्पादन के मूल में होते है।

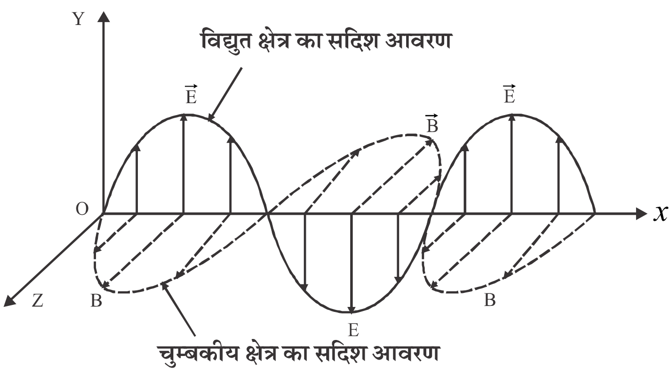
विद्युत चुंबकीय तरंगों का प्रायोगिक प्रदर्शन सर्वप्रथम हर्ट्ज द्वारा सन् 1887 में किया गया। हर्ट्ज की प्रायोगिक व्यवस्था में दोलनी विद्युत द्विध्रुव की सहायता से लगभग 6 cm तरंग दैर्ध्य की विधुत चुंबकीय तरंगों की उत्पत्ति की गई थी। इसके सात वर्ष उपरांत भारतीय वैज्ञानिक आचार्य जगदीश चन्द्र बसु ने प्रयोगशाला में 5 mm से 25 mm तरंगदैर्ध्य परास की विद्युत चुंबकीय तरंगों की सफलता पूर्वक उत्पत्ति की। आचार्य बसु इन तरंगों को प्रयोगशाला की दूरियों की सीमा में संसूचित करने में सफल रहे। इसके थोड़े ही समय पश्चात इटली के वैज्ञानिक मार्कोनी ने इतनी ही परास की तरंग दैध्यों की विद्युत चुंबकीय तरंगों को ऐन्टेना की सहायता से कई किलामीटर दूरी तक संप्रेषित करने में सफलता प्राप्त की। बाद में मार्कोनी ने इन तरंगों की सहायता से बेतार संप्रेषण (wireless communication) में भी सफलता प्राप्त की (भारत की पराधीनता एवं आवश्यक प्रायोगिक सुविधाओं के लिए आर्थिक अभाव ही संभवतः वह कारण रहे कि आचार्य जगदीश चन्द्र बसु को उनकी उपलब्धियों का वह श्रेय नही मिला जिसके लिए वे सच्चे हकदार थे। आचार्य जगदीश चन्द्र बसु ने विज्ञान के अनेक क्षेत्रों में भी कार्य किया जिनमें सर्वाधिक उल्लेखनीय कार्य पेड़ पौधों को भी पक्षियों की भांति सजीव सिद्ध करना था)।

अब हम विद्युत चुंबकीय तरंगों के कुछ मुख्य अभिलक्षणों की विवेचना करेंगे। इनमें से कुछ की व्याख्या के लिए मैक्सवेल

समीकरणों का हल वांछित है परन्तु गणितीय कठिनाइयों को देखते हुए हम इनके गणितीय परिणामों को सीधा प्राप्त मानते हुए विषय प्रवर्तन करेंगे।

(i) विद्युत चुंबकीय तरंगों की प्रकृति एवं संचरण (Nature of Electro Magnetic Waves and Propagation)

मैक्सवेल समीकरणों से प्राप्त परिणामों के अनुसार विद्युत चुंबकीय तरंग युग्मित विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्रों जो समय एवं समष्टि में दोनों में परिवर्तित होते हैं, की तरह चलती है। क्षेत्र सदिश $\vec{E}$ तथा $\vec{B}$ एक दूसरे के लंबवत होते हैं तथा तरंग संचरण की दिशा के भी लंबवत होते हैं इस प्रकार विद्युत चुंबकीय तरंग संचरण की दिशा सदिश गुणन $\vec{E}\times\vec{B}$ की दिशा में होती है। चित्र 17.4 में धनात्मक दिशा में गतिमान एक समतल ध्रुवित विद्युत चुंबकीय तरंग को दर्शाया गया है जहाँ E, y दिशा में तथा B, z दिशा में है।



चित्र 17.4 एक रेखीय विद्युत चुंबकीय तरंग जो x दिशा में गमन कर रही है जिसका दोलनशील विद्युत क्षेत्र y दिशा में तथा दोलन कारी चुंबकीय क्षेत्र z दिशा के अनुदिश है।

इस प्रकार की तरंगों के लिए E_y तथा B_z को निम्नानुसार लिख सकते हैं

$$E_y(x,t) = E_m \sin(kx - \omega t) \qquad \ldots(17.7)$$

$$B_z(x,t) = B_m \sin(kx - \omega t) \qquad \ldots(17.8)$$

यहाँ E_y व B_z क्रमशः विद्युत व चुंबकीय क्षेत्रों के तात्क्षणिक मान हैं तथा E_m एंव B_m इन क्षेत्रों के आयाम हैं $k = 2\pi/\lambda$ कोणीय तरंग संख्या है, λ तरंग दैर्ध्य है तथा ω कोणीय आवृत्ति है। तरंग की चाल ω/k से दी जाती है। समीकरणों 17.7 तथा 17.8 को मैक्सवेल समीकरणों के साथ काम लेकर हम प्राप्त कर सकते हैं कि निर्वात में विद्युत चुंबकीय तरंग की चाल

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \in_0}} \qquad \ldots(17.9)$$

से दी जाती है। उपर्युक्त समीकरण में μ_0 व $\in_0$ के मान रखने पर हम पाते हैं कि

$$c = 2.99792 \times 10^8\ m/s\ (\approx 3 \times 10^8\ m/s)$$

जो निर्वात में प्रकाश की चाल है। अतः प्रकाश की विद्युत चुंबकीय प्रकृति स्थापित होती है। मैक्सवेल समीकरणों की सहायता में यह भी सिद्ध किया जा सकता है कि $\vec{E}$ व $\vec{B}$ के परिमाण इस प्रकार संबंधित हैं

$$E = cB \qquad \ldots(17.10\text{अ})$$

साथ ही $E_m = cB_m \qquad \ldots(17.10\text{ब})$

$\vec{E}$ तथा $\vec{B}$ सदैव समान कला में दोलन करते हैं। यदि विद्युत चुंबकीय तरंग निर्वात के स्थान पर किसी माध्यम में (यथा, काँच, पानी इत्यादि) में चलती है तब इसकी चाल

किसी माध्यम में वि.चु.तरंग की चाल$= \dfrac{1}{\sqrt{\mu \in}} = \dfrac{c}{\sqrt{\mu_r \in_r}} \qquad \ldots(17.11)$

से दी जाती है जहाँ   तथा $\in$ माध्यम की क्रमशः चुंबकीय पारगम्यता एवं विद्युतशीलता है। μ_r तथा $\in_r$ क्रमशः माध्यम की आपेक्षिक पारगम्यता एवं आपेक्षिक विद्युतशीलता है। उपर्युक्त समीकरण को निम्नानुसार भी लिखा जाता है–

$$v = \frac{c}{n} \qquad \ldots(17.12)$$

जहाँ $n = \sqrt{\mu_r \in_r}$ माध्यम का अपवर्तनांक है।

जैसा कि ऊपर वर्णित किया जा चुका है कि विद्युत चुंबकीय तरंगों में विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्र परपस्पर लंबवत होने के साथ तरंग संचरण की दिशा के भी लंबवत हैं अतः विद्युत चुंबकीय तंरग अनुप्रस्थ प्रकृति की होती है। यांत्रिक अनुप्रस्थ तरंगों के अध्ययन में आपने पढ़ा होगा कि इनमें माध्यम के कण तरंग संचरण की दिशा के लंबवत कम्पन करते हैं। विद्युत चुंबकीय तरंगों के संचरण हेतु माध्यम का होना अनिवार्य नहीं है अतः यहाँ विस्थापित होने हेतु कोई कण नहीं है। विद्युत चुबकीय तरंगों की अनुप्रस्थ प्रकृति क्षेत्र सदिशों के संचरण दिशा के लंबवत होने को ही परिलक्षित करता है।

(ii) विद्युत चुंबकीय तरंगों द्वारा ऊर्जा वहन (Energy Transmission by Electro Magnetic Waves)

यांत्रिक तरंगों की भांति विद्युत चुंबकीय तरंगे भी ऊर्जा वहन करती है किसी बल्ब से प्राप्त प्रकाश तथा आग से प्राप्त ऊष्मीय विकिरण, विद्युत चुंबकीय तरंगों द्वारा ऊर्जा प्रवाह के सामान्य उदाहरण हैं।

स्थिर विद्युत क्षेत्र के अध्ययन के समय आपने देखा है कि विद्युत क्षेत्र के एकांक आयतन की ऊर्जा, जिसे विद्युतीय ऊर्जा घनत्व कहते हैं $u_E = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$ से दी जाती है। इसी प्रकार चुंबकीय क्षेत्र से संबद्ध चुंबकीय ऊर्जा घनत्व $u_B = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0}$ से दिया जाता है। विद्युत चुंबकीय तरंगों के संदर्भ में भी उपर्युक्त सूत्र मान्य है यदि E व B को क्रमशः विद्युत क्षेत्र एवं चुंबकीय क्षेत्र के तात्क्षणिक मान विचारित किया जाए। चूंकि विद्युत एवं चुबकीय क्षेत्र परिवर्ती है अतः अब u_E व u_B भी समय के साथ परिवर्तित होंगे। संबंध $B = E/c$ तथा $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ से हम देख सकते हैं कि

$$u_B = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0} = \frac{1}{2}\frac{E^2}{c^2\mu_0} = \frac{1}{2}\frac{E^2}{\mu_0}(\mu_0 \epsilon_0)$$

$$= \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 = u_E$$

अतः कुल तात्क्षणिक ऊर्जा घनत्व

$$u = u_B + u_E = 2u_E = 2u_B$$

$$= \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0} \qquad \ldots (17.13)$$

से दिया जा सकता है। यह भी कहा जा सकता है कि किसी दिए गए आयतन में ऊर्जा में विद्युत एवं चुबंकीय क्षेत्र दोनों की समान सहभागिता होती है। यदि $E = E_y = E_m \sin(kx - \omega t)$ से व्यक्त किया जाए तथा यह तथ्य याद रखा जाए कि एक पूर्णचक्र या कई पूर्ण चक्रों के लिए $\sin^2(kx - \omega t)$ का औसत मान $<\sin^2\theta> = <\cos^2\theta> = \frac{1}{2}$ होता है तो कुल माध्य ऊर्जा घनत्व

$$u_{av} = \epsilon_0 < E^2 >_{av} = \frac{1}{2}\epsilon_0 E_m^2 = \frac{B_m^2}{2\mu_0} \ldots (17.14)$$

से दिया जाता है।

एकांक क्षेत्रफल से ऊर्जा प्रवाह की दर को पॉयटिंग सदिश (Poyting Vector) $\vec{S}$ द्वारा व्यक्त किया जाता है जैसे

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}(\vec{E} \times \vec{B}) \qquad \ldots (17.15)$$

तथा इसका परिमाण $S = \frac{EB}{\mu_0}$ $\qquad \ldots (17.16)$

से दिया जाता है।

ज्यावक्रीय तरंगों के लिए समतल विद्युत चुंबकीय तरंग की तीव्रता I एक चक्र पर पॉयटिंग सदिश के औसत मान के बराबर होती है।

$$\therefore \quad I = S_{av} = \frac{E_m B_m}{2\mu_0} = \frac{E_m^2}{2\mu_0 c} = cU_{av} \qquad \ldots (17.17)$$

(iii) विद्युत चुंबकीय तरंगो का संवेग एवं दाब (Momentum and Pressure Asociated with Electro Magnetic Waves)

विद्युत चुंबकीय तंरगों में ऊर्जा होती है इस कारण इनमें संवेग भी होता है। अतः जब विद्युत चुंबकीय तरंगे किसी सतह पर आपतित होती है तब सतह पर दाब पड़ता है यदि किसी सतह पर किसी समयान्तराल Δt में कुल स्थानांतरित ऊर्जा U है तो यदि सतह संपूर्ण ऊर्जा अवशोषित करती है तब सतह को स्थानांतरित कुल संवेग

$$p = \frac{U}{c} \qquad \ldots (17.18)$$

से दिया जाता है। यदि सतह पूर्णतः परावर्तक है तब स्थानांतरित संवेग

$$p = \frac{2U}{c} \qquad \ldots (17.19)$$

द्वारा दिया जाता है। इस प्रकार संवेग स्थानांतरण से सतह पर दाब लगता है। जिसके लिए सूत्र निम्नानुसार प्राप्त होते हैं। यदि सतह पूर्णतः अवशोषक है तो दाब

$$P = \frac{I}{c} \qquad \ldots (17.20)$$

तथा पूर्णतः परावर्तक सतह के लिए

$$P = \frac{2I}{c} \qquad \ldots (17.21)$$

जहाँ I तरंग की तीव्रता है!

(v) विद्युत चुंबकीय तरंगें अध्यारोपण के सिद्धान्त का पालन करती हैं इस प्रकार अन्य तरंगों द्वारा प्रदर्शित गुण जैसे अपवर्तन, परावर्तन, व्यतिकरण, विवर्तन इत्यादि विद्युत चुंबकीय तरंगों द्वारा भी दर्शाए जाते हैं। अनुप्रस्थ प्रकृति की होने के कारण इनका ध्रुवण भी किया जा सकता है। अप्रगामी विद्युत चुंबकीय तरंगें भी उत्पन्न की जा सकती है तथा इनके लिए डाप्लर प्रभाव भी प्रेक्षित होता है।

उदाहरण 17.2 एक प्रकाश बल्ब सभी दिशाओं में एक समान रूप से गोलाकार विद्युत चुंबकीय तरंगें उत्सर्जित करता है। 50 W विद्युत चुंबकीय उत्सर्जन मानते हुए बल्ब से 3 m दूरी पर ज्ञात करें (अ) तीव्रता (ब) विकिरण दाब तथा (स) विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्रों के परिमाण

हल: बल्ब से r दूरी पर ऊर्जा $4\pi r^2$ पृष्ठीय क्षेत्रफल पर एक समान वितरित होगी अतः

(अ) तीव्रता = शक्ति / क्षेत्रफल $= \dfrac{50}{4\pi r^2}$

$$= \frac{50}{4 \times 3.14 \times (3)^2} = 0.44\, W/m^2$$

(ब) विकिरण दाब

$$P = \frac{I}{c} = \frac{0.44}{3 \times 10^8} = 1.47 \times 10^{-9}\, \text{N/m}^2$$

(द) सूत्र $I = \dfrac{E_m^2}{2\mu_0 c}$

से $E_m = \sqrt{2\mu_0 I c}$

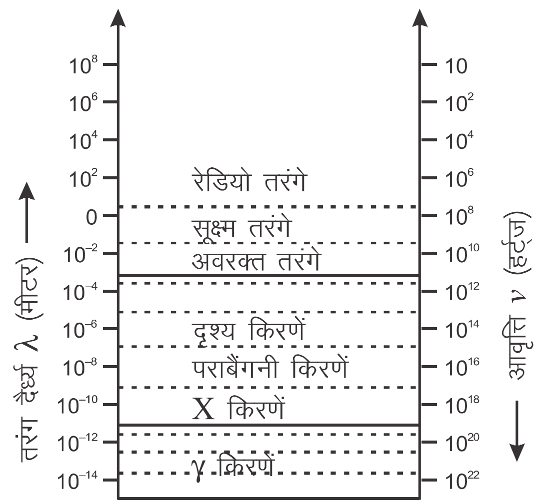
$$= \sqrt{2(4\pi \times 10^{-7}\, m/A) \times 0.44 (W/m^2) \times 3 \times 10^8\, m/s}$$

$$= 18.2\, V/m$$

तथा $\quad B_m = \dfrac{E_m}{c} = \dfrac{18.2}{3{'}\ 10^8} = 6.08 \times 10^{-8}\, T$

17.4 विद्युत चुंबकीय स्पैक्ट्रम (Electro Magnetic Spectrum)

हमने देखा है कि सभी विद्युत चुंबकीय तरंगें निर्वात में प्रकाश की चाल c से चलती है। इन तरंगों द्वारा ऊर्जा एवं संवेग का अभिगमन होता है। मैक्सवेल के समय केवल दृश्य प्रकाश तथा कुछ हद तक आवश्यक तरंगों के बारे में ही जानकारी उपलब्ध थी। सन 1888 में हर्ट्ज द्वारा रेडियो तरंगों की उत्पत्ति हुई। वर्तमान में हम जानते हैं कि दृश्य प्रकाश, पराबैंगनी किरणें अवरक्त किरणें, रेडियो तरंगे, सूक्ष्म तरंगे, X किरणें तथा γ किरणें सभी विद्युत चुंबकीय प्रकृति की है। इन सभी के मूल में कहीं न कहीं त्वरित (मंदित) आवेशों की भूमिका है। विभिन्न प्रकार की विद्युत चुंबकीय तरंगें केवल आवृत्ति या तरंग दैर्ध्य में ही भिन्न होती हैं तरंगों की आवृति (तरंग दैर्ध्य) के क्रम में वर्गीकरण (चित्र 17.5) विद्युत चुबंकीय स्पैक्ट्रम कहलाता है। यह वर्गीकरण इस अर्थ में सुस्पष्ट नहीं है कि इसके विभिन्न भागों को पृथक करने वाली परिसीमाएँ तीक्ष्णतः परिभाषित नहीं है। उदाहरण के लिए γ किरण क्षेत्र तथा X किरण क्षेत्र में अतिव्यापन होता है हमारे पास 0.1 Å की X किरणें व γ किरणें दोनों ही हो सकती है, इनके सभी गुण समान होंगे। ये मूलतः इनके उद्‌गम में ही भिन्न हैं (γ किरणें नाभिकीय संक्रमणों के कारण जबकि X किरणें परमाणु की आन्तरिक कोश संरचना संबंधी प्रक्रमों से संबद्ध होती हैं जो उच्च वेगों के इलेक्ट्रानों के किसी भारी धातु के लक्ष्य द्वारा रोके जाने पर प्राप्त होती है।) मोटे तौर पर हम यही कह सकते हैं कि γ किरणों की तरंगों की तरंग दैर्ध्य पर कोई सीमाबंधन नहीं है।



चित्र 17.5 विद्युत चुंबकीय स्पैक्ट्रम

अब हम विद्युत चुंबकीय स्पैक्ट्रम के विभिन्न क्षेत्रों का उनकी तरंग दैर्ध्यों के अवरोही (घटते हुए) क्रम में अध्ययन करेंगे।

रेडियो तरंगे (Radio Waves)

रेडियो तरंगे चालक तारों यथा ऐन्टेना में चालक तारों में त्वरित आवेशों के कारण होती हैं। इनके जनन के लिए इलेक्ट्रॉनिक युक्तियों यथा LC दोलित्र का उपयोग किया जाता है तथा इनका अनुप्रयोग रेडियो तथा टेलीविजन की संचार प्रणालियों में किया जाता है। इनकी आवृति परास लगभग 500 kHz से 1000 MHz तक होता है। AM (आयाम माडुलित) बैंड के संगत रेडियों तरंगों की परास 530 kHz से 1710 kHz के मध्य होती है। FM (आवृति मॉडुलित) रेडियो बैंड की परास 88 MHz से 108 MHz तक होती है। टेलीविजन तरंगों की परास 54 MHz से 890 MHz के मध्य होती है। अत्युच्च आवृति (UHF) बैंड 840 MHz से 935 MHz परास में होता है जो सेल्यूलर फोन संचार प्रणाली में काम आती है।

रेडियो तरंगों का संसूचन विद्युत द्विध्रुव ऐन्टेना अथवा (चुंबकीय) लूप ऐन्टेना द्वारा किया जाता है। प्रथम प्रकार के ऐन्टेना में आपतित विद्युत चुंबकीय संकेत स्थापित करता है जिसे संसूचित किया जाता हैं लूप ऐन्टेना में विद्युत चुबकीय तरंगों को दोलनी चुंबकीय क्षेत्र एक प्रेरित विद्युतवाहक बल स्थापित करता है जिसे संसूचित किया जाता है।

सूक्ष्म तरंगें (Micro waves)

इस प्रकार की विद्युत चुंबकीय तरंगों की तरंग दैर्ध्य $\lambda = 0.001\text{m}$ से 0.1 m परास में होती है इनकी आवृत्तियाँ GHz कोटि की होती हैं। इन्हें इलेक्ट्रानिक युक्तियाँ जैसे क्लिस्ट्रान, मेग्नेट्रॉन या गन डायोड इत्यादि द्वारा जनित किया जाता है। इनकी लघु तरंग दैर्ध्यों के कारण इनका उपयोग वायुयानों के नेवीगेशन में प्रयुक्त राडार प्रणालियों, चाल मापक गनों (speed guns) में किया जाता है।

इन्हें पदार्थ के परमाण्विक एवं आविक गुणों के अध्ययन के लिए भी उपयोग किया जाता है। इनका एक घरेलू उपयोग माइक्रोवेव ऑवन है। भोज्यपदार्थों में यथा सब्जियों, फल, अनाज इत्यादि में जल एक अवयव के रूप में उपस्थित होता है। जल के अणुओं की स्वाभाविक आवृति लगभग 3 GHz है। यदि इस परास की सूक्ष्म तरंगे जल के अणुओं पर आपतित हों तो यह जल के अणुओं द्वारा अवशोषित हो जाती है, जो जल को गर्म करने के ही समान हैं। जल के अणु शीघ्रता से यह ऊर्जा भोज्य पदार्थ के अन्य अणुओं को स्थानांतरित कर देते हैं इस प्रकार माइक्रोवेव ऑवन में भोजन गर्म किया जाता है। माइक्रोवेव ऑवन में सामान्यतः चीनी मिट्‌टी के बर्तनों का उपयोग किया जाता है जो सूक्ष्म तरंगों का अवशोषण नही करता इस कारण बर्तन को गर्म करे बिना भोजन पक जाता है, इस प्रकार ऊर्जा की बचत होती है। माइक्रोवेव ऑवन में धातु के पात्रों का उपयोग खतरनाक है। ये विद्युत क्षेत्र से ऊर्जा ग्रहण कर अत्यधिक ऊष्मा से पिघल सकते है अथवा प्रेरित विद्युत आवेशों के कारण विद्युत झटका (Electric shock) भी दे सकते हैं।

अवरक्त तरंगे (Infrared Rays)

इन किरणों का स्पैकट्रम लगभग 1 m से 700 nm तक विस्तृत हैं। ये गर्म वस्तुओं के अणुओं द्वारा उत्सर्जित होती है तथा अधिकांश पदार्थों द्वारा अवशोषित की जाती है। अवरक्त किरणों के कई व्यवहारिक एवं वैज्ञानिक उपयोग हैं इनमें काय चिकित्सा (physiotherapy) इन्फ्रारेड फोटोग्राफी तथा कम्पन स्पैक्ट्रोस्कोपी प्रमुख हैं। आप घर मे जिस रिमोट कन्ट्रोल का उपयोग टीवी, डीवीडी प्लेयर इत्यादि इन उपकरणों का चलाने या बन्द करने में करते हैं, उनमें भी अवरक्त किरण उपयोग किए जाते है।

दृश्यप्रकाश (Visible Light)

यह विद्युत चुंबकीय स्पैक्ट्रम का सबसे सुपरिचित क्षेत्र हैं जिसे मानव नेत्र संसूचित कर सकते हैं। अन्य क्षेत्रों की तुलना में यह सबसे छोटी परास का तरंग दैर्ध्य क्षेत्र है जो 380 nm से 780 nm तक विस्तृत है। 380 nm की तरंग दैर्ध्य बैंगनी रंग तथा 780 nm की तरंग दैर्ध्य लाल रंग के संगत है। मानव नेत्र की संवेदनशीलता पीले रंग 550 nm के लिए सर्वाधिक है। प्रकाश गर्म वस्तुओं जैसे प्रकाश बल्ब ततुंओं से उत्सर्जित होता है। प्रकाश प्रकाशिक विज्ञान तथा प्रकाशिक उपकरणों का आधार है।

पराबैंगनी प्रकाश (Ultraviolet Light)

विद्युत स्पैक्ट्रम का यह क्षेत्र 1 nm से 380 nm तरंग परास में होता है। सूर्य, पराबैंगनी प्रकाश का मुख्य स्त्रोत है तथा यह त्वचा को झुलसाने तथा त्वचा कैंसर का कारण बनता है। सौभाग्य से वायुमंडल में उपस्थित ओजॉन (O_3) परत इन किरणों का अवशोषण कर हमें इनके हानिकारक प्रभावों से बचाती है। क्लोरोफ्लोरो कार्बन गैसों, जैसे फ्रेयॉन जो एयरोसॉल स्प्रे तथा रेफ्रिजरेटरों मे काम आता है, के कारण ओजॉन परत में क्षय हो रहा है जो पर्यावरण के लिए चिंता का विषय है। पराबैंगनी किरणों का उपयोग जल शोधनों में जीवाणुओं को मारने में, नेत्रशल्यता में काम आने वाली लासिक (LASIK) प्रणाली में होता है।

X किरण (*X* rays)

विद्युत चुंबकीय स्पेक्ट्रम के *X*-किरण क्षेत्र का तरंग दैर्ध्य परास 1 nm से 10^{-3} nm के मध्य हैं इनका उत्पादन उच्च इलेक्ट्रानों के पुंज की धात्विक लक्ष्य पर बौछार द्वारा किया जाता है। इनका उपयोग चिकित्सा में निदान तथा कुछ प्रकार के कैंसर ऊतकों को नष्ट करने में होता है। पदार्थ विज्ञान के क्षेत्र में *X* किरणें क्रिस्टल संरचना ज्ञात करने में काम आती है क्योंकि इनकी तरंग दैर्ध्य की कोटि ठोस में अन्तरापरमाणविक दूरियों की कोटि की होती है। *X* किरणों का चालक तलों से विवर्तन हमें क्रिस्टल की संरचना के बारे में जानकारी प्रदान करता है।

γ किरणे (γ rays)

ये विद्युत चुंबकीय क्षेत्र के उच्च आवृत्ति क्षेत्र में होती हैं। इनका तरंग दैर्ध्य लगभग 10^{-10} m से लेकर 10^{-14} m से भी कम तक होता है। जैसा कि आप नाभिकीय भौतिकी में पढ़ चुके हैं α क्षय तथा β क्षय के उपरांत नाभिक उत्तेजिक अवस्था में प्राप्त होता है तो यह γ किरण को उत्सर्जित कर अत्यन्त मूल अवस्था से आता है। γ किरणों का नियंत्रित उपयोग कैंसर की चिकित्सा में होता है पर लंबे समय तक मानवशरीर के γ किरणों के संपर्क से कैंसर उत्पन्न भी हो सकता है तथा यह जीवित ऊतकों को भी नष्ट कर सकता है जो शरीर को हानि पहुँचाते हैं।

17.5 विद्युत चुम्बकीय तरंगों का संचरण (Propagation of Electro Magnetic Waves)

संचार निकाय में विद्युत चुम्बकीय तरंगें प्रेषी ऐंटेना द्वारा आकाश में संचरण के लिए प्रेषित की जाती है। जैसे–जैसे विद्युत चुम्बकीय तरंगें प्रेषित से दूर होती हैं तो इनकी तीव्रता कम होती जाती है एवं इनमें रव (noise) सम्मिलित होती है। विद्युत चुम्बकीय तरंगों का संचरण गमन पथ, प्रेषण कोण आदि कई कारकों पर निर्भर करता है।

संकेत युक्त तरंगें प्रेषी से अभिग्राही तक तीन प्रकार से संचरित होती हैं :– (a) भू–तरंग संचरण (ground wave or surface wave propagation); (b) आकाश तरंग संचरण (space wave propagation) तथा (c) व्योम तरंग संचरण (sky wave propagation)।

17.5.1 भू–तरंग संचरण (Ground or Surface Wave Propagation)

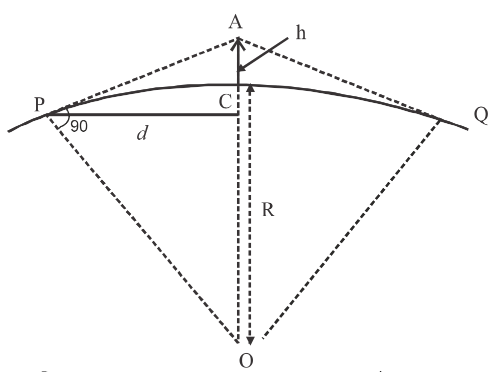
भू–तरंग संचरण में प्रेषी व अभिग्राही ऐन्टेना पृथ्वी तल के निकट स्थित होते हैं। इस विधि में तरंगें पृथ्वी की सतह के सहारे संचरित होकर प्रेषी से अभिग्राही तक पहुँचती हैं। इस तरंग में विद्युत क्षेत्र का क्षैतिज ध्रुवित(horizontally polarised) घटक तरंग संचरण के साथ पृथ्वी तल द्वारा लघुपथित होने से घटता जाता है और तरंग ऊर्ध्व ध्रुवित (vertically polarised) हो जाती

हैं। पृथ्वी के तल के द्वारा इन तरंगों का अवशोषण होता है। इसलिए जैसे–जैसे प्रेषी ऐन्टेना से दूरी बढ़ती जाती है तरंगों की तीव्रता कम होती जाती है। भू–तरंग संचरण कम आवृत्ति (low frequencies) की तरंगों के लिए अधिक उपयुक्त होता है क्योंकि अधिक आवृत्ति की तरंगों का पृथ्वी के तल के द्वारा अवशोषण अधिक होता है। इसीलिए भू–तरंगों की आवृत्ति 1 MHz से कम रखी जाती है तथा इनके द्वारा सीमित दूरी (लगभग 500 km) तक ही रेडियो तरंगों का संचरण सम्भव होता है।

17.5.2 आकाश तरंग संचरण (Space Wave Proagation)

संचरण की इस विधि में विद्युत चुम्बकीय मॉडुलित वाहक तरंगें क्षोभ मण्डल में गमन करती हुई सीधे प्रेषित्र से अभिग्राही तक पहुंच जाती हैं। क्षोभ मण्डल(troposphere) पृथ्वी सतह से लगभग 12 किलोमीटर ऊँचाई तक होता है व इस प्रभाग में बादलों की उपस्थिति महत्वपूर्ण होती है। शुष्क वायु का परावैद्युतांक नम वायु के परावैद्युतांक के सापेक्ष कुछ अधिक होता है। इस कारण अपवर्तन द्वारा क्षोभ मण्डल में क्षैतिज दिशा में संचरित तरंगें पृथ्वी की ओर अल्प मात्रा में मुड़ जाती हैं जिससे तरंग संचरण में सहायता मिलती है। पृथ्वी की वक्रता के कारण इस विधि से संचरण अधिक दूरी तक संभव नहीं होता। प्रसारण दूरी ऐन्टेना की ऊँचाई पर निर्भर होती है। यह संचरण दृष्टि रेखा(Line of Sight) तक ही सीमित होता है।

चित्र 17.6 में A एक ऐन्टेना है जो पृथ्वी की सतह से h ऊँचाई पर स्थित हैं। पृथ्वी की गोलाई के कारण A से उत्सर्जित तरंगें सीधे रेखा में गमन करती हुई चित्रानुसार PQ प्रभाग में पहुँच सकती हैं। ऐन्टेना की स्थिति C से इस प्रकार प्रसारण दूरी $CP = CQ = d$ होगी। यदि पृथ्वी की त्रिज्या R है व केन्द्र O है तो समकोण त्रिभुज OPA के लिये $h << R$ की स्थिति होने से



चित्र 17.6 आकाश तरंग संचरण में LOS

$$OA^2 = OP^2 + PA^2$$

या $$(R+h)^2 = R^2 + d^2 \left(PA \quad PC = d\right)$$

या $$R^2 + 2hR + h^2 = R^2 + d^2$$

या $$h(2R+h) = d^2$$

या $$h(2R) = d^2$$

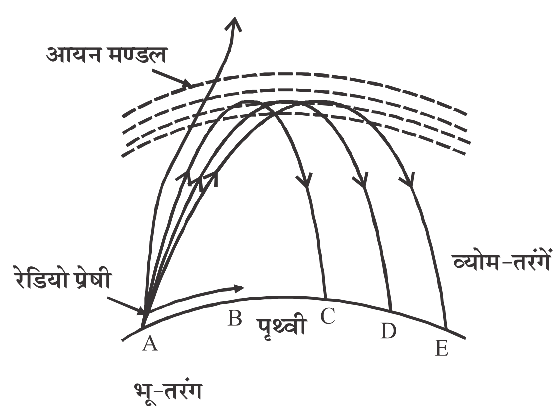
($h << 2R$ होने से $2R$ की तुलना नगण्य है)

जिससे $$d = \sqrt{2Rh} \qquad \ldots(17.22)$$

क्षोभ मण्डलीय संचरण में 100 से 200 MHz आवृत्तियों की वाहक तरंगों का उपयोग किया जाता है।

17.5.3 व्योम तरंग संचरण (Sky Wave Propagation)

व्योम तरंगों के द्वारा रेडियो तरंगों का प्रसारण रेडियो प्रेषी से सुदूर स्थित स्थानों तक किया जा सकता है। इस प्रकार के संचरण में वायु मण्डल की परत, जिसे आयन मण्डल (ionosphere) कहते हैं, का उपयोग किया जाता है। आयन मण्डल का विस्तार पृथ्वी की सतह से 80 km से 400 km ऊँचाई तक होता है। आयन मण्डल कई परतों में बँटा हुआ होता है। आयन मण्डल में इलेक्ट्रॉन तथा कम घनत्व की गैसों के आयन पाये जाते हैं जिनकी उत्पत्ति उस ऊँचाई पर स्थित कम घनत्व की वायु में सूर्य से आने वाली पराबैंगनी तथा X-किरणों द्वारा आयनीकरण के कारण होती है। आयन मण्डल की विभिन्न परतों में आयन तथा इलेक्ट्रॉन प्लाज्मा का घनत्व भिन्न होता है। इलेक्ट्रॉन घनत्व ऊँचाई के साथ बढ़ता है जिससे माध्यम का प्रभावी अपवर्तनांक घटता जाता है। जब माडुलित रेडियो तरंगें इस प्रकार के परिवर्ती घनत्व वाली परतों के माध्यम पर एक निश्चित आपतन कोण से अधिक कोण पर आपतित होती हैं तो उनका इस प्रकार अपवर्तन होता है कि तरंगें अभिलम्ब से दूर हटती जाती हैं। इस प्रक्रिया में एक ऐसी स्थिति आती है कि इन तरंगों का पूर्ण परावर्तन हो जाता है जिसके फलस्वरूप प्रेषित मॉडुलित रेडियों तरंगें आयन मण्डल से परावर्तित होकर पृथ्वी की ओर लौटती हैं। इन्हीं परावर्तित तरंगों को अभिग्राही द्वारा ग्रहण किया जाता है। इस प्रकार रेडियो तरंगों का संचरण व्योम तरंग के द्वारा रेडियो स्टेशन से सुदूर स्थानों तक संभव हो जाता है। चित्र 17.7 में व्योम तरंग के द्वारा रेडियो तरंगों के संचरण को प्रदर्शित किया गया है। आयन मण्डल से रेडियो तरंगों का परावर्तन, तरंग की आवृत्ति, समय (दिन तथा रात्रि), मौसम इत्यादि कई बातों पर निर्भर करता है। इसी कारण व्योम तरंगों के द्वारा प्रसारित किये गये रेडियो प्रोग्रामों की तीव्रता व स्पष्टता समयानुसार बदलती रहती है। रात्रि के समय आयन मण्डल में विक्षोभ कम होता है अतः रात्रि में व्योम तरंगों द्वारा प्राप्त रेडियो कार्यक्रम अधिक स्पष्ट सुनाई देते हैं। इस विधि से 30 MHz तक की तरंगो का किया संचरण जाता है।



चित्र 17.7 व्योम तरंग संचरण

उदाहरण 17.3 एक मीनार के शिखर पर लगे प्रेषक ऐन्टेना की ऊँचाई 32 m है तथा अभिग्राही ऐन्टेना की भूतल से ऊँचाई 50 m है। उनके मध्य की अधिकतम दूरी, जिसके लिये दृष्टि रेखा विधा (LoS mode) में संतोषप्रद संचार हो सके, क्या होगी (पृथ्वी की त्रिज्या $= 6.4\times10^6$ m)

हल: प्रेषी ऐन्टेना की ऊँचाई $h_T = 32\,\text{m}$

अभिग्राही ऐन्टेना की ऊँचाई $h_R = 50\,\text{m}$

इनके मध्य संचार की अधिकतम दूरी

$$d_m = \sqrt{2Rh_T} + \sqrt{2Rh_R}$$

$$= \sqrt{2\times6.4\times10^6\times32} + \sqrt{2\times6.4\times10^6\times50}$$

$$= 20.2\,\text{km} + 25.3\,\text{km} = 45.5\,\text{km}$$

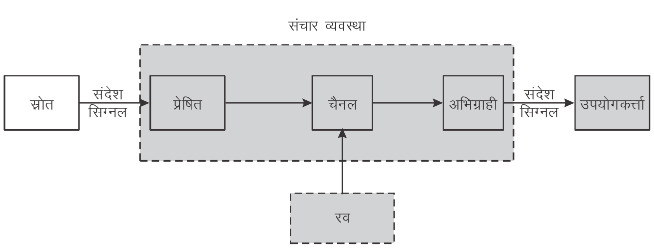
17.6 संचार तन्त्र (Communication System)

एक व्यक्ति या युक्ति से दूसरे व्यक्ति या युक्ति के बीच श्रव्य व दृश्य संकेत, सूचना तथा आंकड़ों (data) का संचरण संचार कहलाता है। सूचना का संचरण मनुष्य के लिए नया नहीं है। प्राचीन काल में मनुष्य पक्षियों के द्वारा सूचना का संचरण करते थे। विकास की गति ने संचार माध्यमों को गति प्रदान की और सूचना के क्षेत्र में अभूतपूर्व क्रान्ति हुई। संचरण में दूत (मानव), चिट्ठी पत्री, फैक्स, टेलिफोन, मोबाइल फोन आदि का उपयोग किया जाता है। संचार की आधुनिक विधि ई–मेल, इंटरनेट, नेटवर्किंग है जिसे कम्प्यूटर द्वारा संचालित किया जाता है। आधुनिक संचार माध्यम के अत्यधिक विकास के कारण दुनिया बहुत छोटी हो गई है। प्रेषित की सूचना अभिग्राही तक चैनल के माध्यम से भेजी जाती है। संचार तंत्र के प्रमुख घटक निम्न हैं:

(i) प्रेषित्र / स्रोत (source / sender)

(ii) माध्यम या संचार चैनल (communication channel) जिससे संकेतों का संचरण होता है।

(iii) अभिग्राही / प्राप्तकर्ता (receiver)

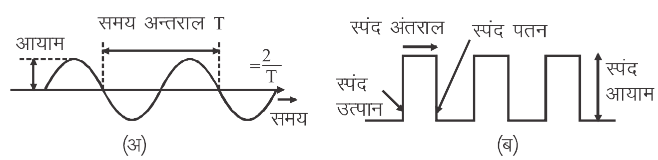


चित्र 17.7 संचार तन्त्र

सामान्यतः स्रोत द्वारा उत्पन्न संदेश या सूचना की प्रकृति विद्युतीय नहीं होती है, इसलिए स्रोत द्वारा उत्पन्न संदेश को एक निवेशी ट्रांसड्यूसर (input transducer) द्वारा समय के साथ परिवर्ती विद्युतीय संकेतों में परिवर्तित कर दिया जाता है जिसे संदेश संकेत (message signal) कहते हैं। इसलिए मूल संकेत से संदेश संकेत प्राप्त करने का कार्य प्रेषित द्वारा होता है। प्रेषित की सूचना अभिग्राही तक चैनल के माध्यम से भेजी जाती है। चैनल के रूप में तार निकाय का प्रयोग होता है किन्तु जब प्रेषक व अभिग्राही के मध्य दूरी अधिक होती है तब तारों अथवा केबल के माध्यम से इनके मध्य विद्युतीय संपर्क सम्भव नहीं होता तब बेतार (वायरलैस) चैनल का प्रयोग किया जाता है। बेतार चैनल की स्थिति में पहले मूल संकेतों को विद्युतीय संकेतों में बदलकर इसके अनुरूप उच्च आवृत्ति की विद्युत चुम्बकीय तरंगों (वाहक तरंगों) के किसी विशिष्ट गुण (आयाम, आवृत्ति, कला) को परिवर्तित किया जाता है। इस प्रक्रिया को मॉडुलन (modulation) कहते हैं। ये उच्च आवृत्ति की मॉडुलित तरंगें प्रवर्धित कर प्रेषी के ऐन्टेना (antenna) द्वारा संचरित कर दी जाती है। सुदूर अभिग्राही अपने ऐन्टेना द्वारा इन तरंगों को ग्रहण कर लेता है। जहाँ इन अल्प आयाम की तरंगों का प्रवर्धन कर विमॉडुलन (demodulation) द्वारा विद्युतीय मूल संकेत प्राप्त हो जाता है। बेतार संचार में वायुमण्डल में तरंग संचरण के समय अवांछनीय रव (Noise) भी सम्मिलित हो जाता है।

17.7 मॉडूलन (Modulation)

अधिकांश संदेश, सूचना या वाक् संकेत निम्न आवृत्ति के होते हैं जिन्हें लम्बी दूरी तक संचरित नहीं किया जा सकता। यद्यपि उच्च आवृत्ति संकेतों को विकिरत या संचरित करना संभव है। इसीलिये, निम्न आवृत्ति संकेतों को कभी–कभी उच्च आवृत्ति तरंग पर वाहित या अध्यारोपित किया जाता है जो सूचना के वाहक की तरह कार्य करती है तथा वाहक तरंगें कहलाती हैं। वह प्रक्रम मॉंडूलन कहलाता है। संकेत सतत (ज्यावक्रीय) या स्पंद रूप में हो सकती है जैसा चित्र 17.8 में दर्शाया गया है।



चित्र 17.8 (a) ज्यावक्रीय तथा (b) स्पंद रूप संकेत

एक ज्यावक्रीय वाहक तरंग को इस प्रकार दर्शाया जा सकता है।

$$c(t) = A_c \sin(\omega_c t + \phi)$$

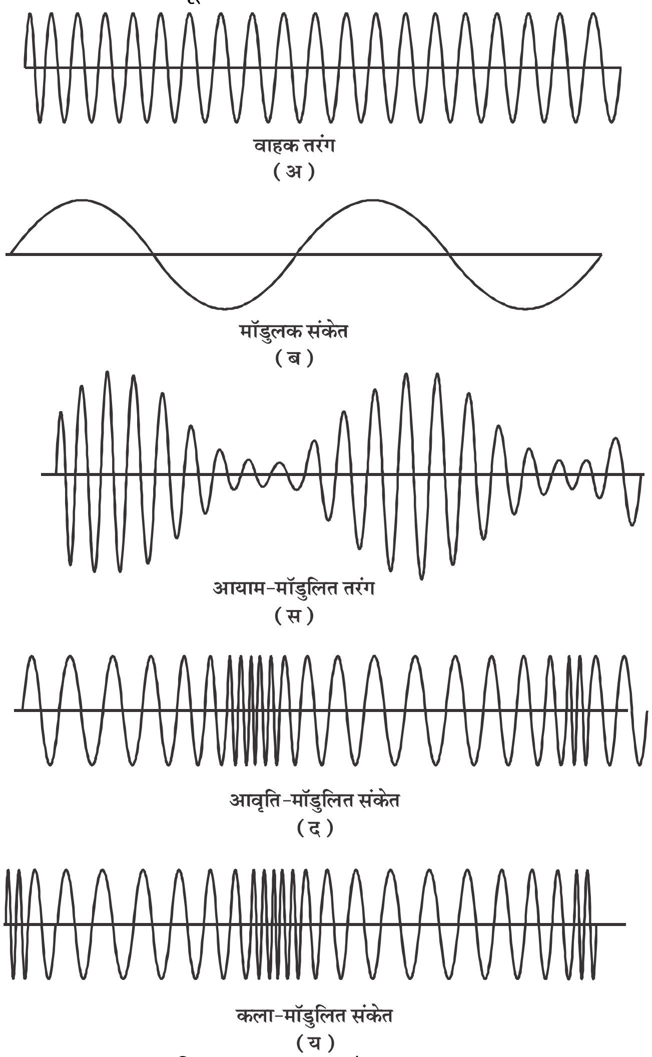
जहाँ $c(t)$ संकेत तीव्रता है (विभव या धारा), A_c आयाम, $\omega_c (= 2\pi v_c)$ कोणीय आवृत्ति है तथा ϕ वाहक तरंग की प्रारम्भिक कला है। माडूलन के प्रक्रम के दौरान, वाहक तरंग के इन तीन प्राचलों में (A_c, ω_c तथा ϕ) से कोई भी सन्देश या सूचना संकेत से नियन्त्रित किया जा सकता है। इसके परिणाम स्वरूप तीन प्रकार का अनालोग मॉडुलन होता है।

(i) आयाम मॉडूलन (Amplitude modulation)

(ii) आवृत्ति मॉडूलन (Frequency modulation)

(iii) कला मॉडूलन (Phase modulation)

तीनों प्रकार के मॉडूलन को चित्र 17.9 में दर्शाया गया है।



चित्र 17.9 अनालोग मॉडूलन

(i) आयाम मॉडूलन (Amplitude modulation)

मॉडूलन की इस विधा में, जैसा चित्र 17.9(स) में प्रदर्शित किया गया है, वाहक तरंग का आयाम मॉडूलक संकेत (सूचना संकेत) के अनुसार रैखिक रूप से परिवर्तित किया जाता है।

चित्र 17.9 (अ) में उच्च आवृत्ति की वाहक तरंग को दर्शाया गया है जबकि चित्र 17.9(ब) निम्न आवृत्ति के सूचना संकेत (जिसे यहाँ मॉडूलक संकेत कहा गया है) को दर्शाया है। हम देख सकते है कि आयाम मॉडूलित तरंग में तरंग का आयाम नियत नहीं रहता है। जब मॉडूलक तरंग के आयाम का तात्क्षणिक मान बढ़ रहा होता है, तो वाहक तरंग के आयाम में भी वृद्धि होती है तथा इसके विपरीत मॉडूलक तरंग के आयाम का मान कम होने पर वाहक तरंग का आयाम भी कम होता हैं। अतः मॉडूलित वाहक तरंग का आयाम नियत न होकर इसका एन्वलेप (envelope) मॉडूलक संकेत के ज्यावक्रीय परिवर्तन के समरूप होगा। दूसरे शब्दों में, मॉडूलित वाहक तरंग निम्न आवृत्ति के संदेश संकेत में निहित सूचना से उद्भारित (loaded) होती है। ध्यान रहे कि वाहक संकेत की कोणीय आवृत्ति स्थिर रहती है।

(ii) आवृत्ति मॉडूलन (Frequency modulation)

मॉडूलन की इस विधा में (चित्र 17.9द)) वाहक संकेत की आवृत्ति, मॉडूलक संकेत के अनुसार परिवर्तित होती है। यहाँ हम देखते हैं कि वाहक तरंग का आयाम तो निश्चित रहता है जबकि इसकी आवृत्ति परिवर्तित हो रही है। जब मॉडूलक वोल्टता के आयाम का तात्क्षणिक मान अधिक होता है तब वाहक आवृत्ति का तात्क्षणिक मान भी उच्चतर होता है तथा जब मॉडूलक वोल्टता का मान कम होता है तो वाहक अवृत्ति की समानुपाती रूप से कम हो जाती है।

(iii) कला मॉडूलन (Phase modulation)

यहाँ वाहक संकेत का कला कोण (phase angle) मॉडूलक वोल्टता के तात्क्षणिक मान के अनुसार परिवर्तित होता है। कला मॉडूलन व आवृत्ति मॉडूलन एक ही प्रकार के मॉडूलन रूप है। चूँकि कला मॉडूलित तरंग की कला संदर्भ वाहक तरंग की कला से कभी आगे (lead) होती है तो कभी पीछे (lag) अतः आवृत्ति में परिवर्तन भी दृष्टिगोचर होता है। चित्र 17.9(य) में कला–मॉडूलन दर्शाया गया है।

17.7.1 मॉडूलन की आवश्यकता (Need of Modulation)

मान लो हम एक विद्युतीय संकेत को श्रव्य आवृत्ति (AF) परास (आधार बैण्ड संकेत आवृत्ति 20 kHz से कम) से लम्बी दूरी पर संचरित करना चाहते हैं। क्या हम यह कर सकते हैं? उत्तर है? ''नहीं'' इसके निम्न कारण है:–

(i) ऐन्टेना या एरियल का आकार (Size of the Antenna or Aerial)

संकेत के संचरण के लिये हमें एक ऐन्टेना या एक एरियल की आवश्यकता होती है, इस ऐन्टेना का आकार संकेत की तरंग दैर्ध्य के समतुल्य होना चाहिए (कम से कम $\lambda/4$ की कोटि) ताकि संकेत में समय के साथ होने वाले परिवर्तन को, ऐन्टेना के द्वारा सही तरीके से संवेदित किया जा सके। 20 kHz आवृत्ति की एक विद्युत चुम्बकीय तरंग के लिये तरंग दैर्ध्य $\lambda = 15\,\text{km}$ है। निःसंदेह इतना लम्बा ऐन्टेना बनाना संभव नहीं है इसीलिये इस प्रकार के आधार बैण्ड संकेतों का सीधा संचरण संभव नहीं है। इसीलिये हमारी मूल (न्यून आवृत्ति आधार बैण्ड संकेत में पाई जाने वाली) सूचनाओं को संचरण से पूर्व उच्च या रेडियो आवृत्तियों में रूपांतरित करने की आवश्यकता होती है।

(ii) एक ऐन्टेना के द्वारा प्रभावी शक्ति विकिरण (Effective Power Radiated by an Antenna)

समान ऐन्टेना लम्बाई के लिये अल्प तरंग दैर्ध्य या उच्च आवृत्ति संकेतों के द्वारा विकिरित शक्ति अधिक होगी। अतः दीर्घ तरंग दैर्ध्य के आधार बैण्ड संकेत से विकिरित शक्ति अल्प होगी। लम्बी दूरी तक संचरण के लिये हमें उच्च शक्ति की आवश्यकता होती है अतः यह तथ्य भी उच्च आवृत्ति संचरण के उपयोग की आवश्यकता को बताता है।

(iii) विभिन्न प्रेषित्रों से प्राप्त संकेतों का मिश्रण (Mixing up of Signal from Different Transmitters)

यदि कई लोग एक समय पर बात कर रहे हो या कई ट्रांसमीटर आधार बैण्ड सूचना संकेतों को साथ–साथ संचरित कर रहे हो तो ये सभी संकेत मिश्रित हो जायेंगे तथा फिर इन्हें विभेदित करने का कोई तरीका नहीं है। अतः बहु–सम्प्रेषण संभव नहीं हैं। यह समस्या भी उच्च आवृत्तियों पर सम्प्रेषण का उपयोग करके दूर होती संभव है उच्च आवृत्ति संचरण में प्रत्येक उपभोक्ता को आवृत्तियों का एक बैण्ड उपलब्ध कराया जाता है जैसे कि यह भिन्न रेडियो/टी. वी. प्रसारण केन्द्रों के लिये किया जाता है।

उपर्युक्त तर्क यह सुझाते हैं कि, मूल निम्न आवृत्ति आधार बैण्ड सन्देश या सूचना संकेत को संचरण से पूर्व उच्च आवृत्ति तरंग के रूपान्तरण जरूरी है। यह रूपान्तरण इस प्रकार हो कि रूपान्तरित संकेत में मूल में निहित सूचनाएँ आवश्यक रूप से पाई जायें, जैसा पूर्व खण्ड में विवेचित किया गया है।

17.7.2 आयाम माँडूलन (Amplitude Modulation)

आयाम माडूलन में वाहक तरंग के आयाम में सूचना संकेत के अनुसार परिवर्तन होता है माना $c(t) = A_c \sin \omega_c t$ वाहक तरंग तथा $m(t) = A_m \sin \omega_m t$ संकेत तरंग या मॉडुलक संकेत को प्रदर्शित करते है जहाँ $\omega_c = 2\pi f_c$ वाहक तरंग की व $\omega_m = 2\pi f_m$ संकेत तरंग की कोणीय आवृत्ति है। अतः मॉडुलित संकेत $c_m(t)$ लिखा जा सकता है

$$c_m(t) = (A_c + A_m \sin \omega_m) \sin \omega_c t$$

$$= A_c \left(1 + \frac{A_m}{A_c} \sin \omega_m t\right) \sin \omega_c t$$

यहाँ संदेश संकेत मॉडुलित संकेत में अंतर्विष्ट है, अब हम लिख सकते हैं

$$c_m(t) = A_c \sin \omega_c t + mA_c \sin \omega_m t \sin \omega_c t \ldots (1)$$

यहाँ $m = \frac{A_m}{A_c}$ मॉडुलित सूचकांक है तथा $m \le 1$ है

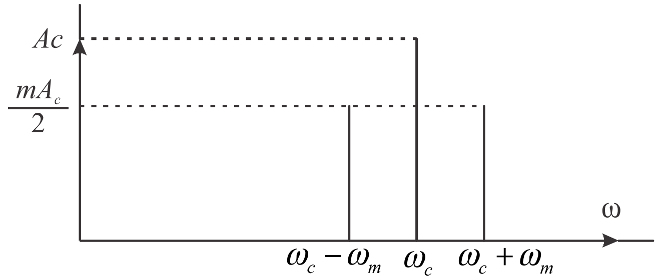
$$\sin A \sin B = \frac{1}{2}\left[\cos(A-B) - \cos(A+B)\right]$$

का उपयोग करने पर हम समीकरण 17.1के $c_m(t)$ को इस प्रकार लिख सकते हैं

$$c_m(t) = A_c \sin \omega_c t + \frac{mA_c}{2} \cos(\omega_c - \omega_m) t$$

$$-\frac{mA_c}{2} \cos(\omega_c + \omega_m) t$$

यहाँ $\omega_c - \omega_m$ तथा $\omega_c + \omega_m$ क्रमशः निम्न पार्श्व तथा उच्च पार्श्व आवृत्तियाँ है। अतः माडूलित संकेत ω_c आवृत्ति की वाहक तरंग तथा दो ज्या वक्रीय तरंगों जिनकी आवृत्तियाँ $\omega_c - \omega_m$ एवं $\omega_c + \omega_m$ कुछ भिन्न होती है तथा जिन्हें पार्श्व बैण्ड कहते हैं, से मिलकर बनी हैं।



चित्र 17.10 किसी आयाम मॉडुलित संकेत के आयाम व ω के बीच ग्राफ

नोटः आयाम मॉडुलन में मॉडुलक संकेत के समानुपाती वोल्टता वाहक तरंग के आयाम में जोड़ी जाती है। मॉडुलक के कारण मॉडुलित संकेत का आयाम A_{max} तथा A_{min} के मध्य परिवर्तित होता है यह परिवर्तन उसके विस्तार को व्यक्त करता है जहाँ तक संकेत मॉडुलित हुआ है।

आयाम मॉडुलन सूचकांक

$$m = \frac{A_m}{A_c} = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}}$$

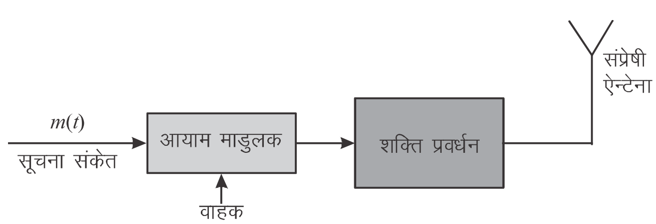
यदि $m = 0$, कोई मॉडुलन नहीं

$m \ge 1$, अति मॉडुलन

$0 < m < 1$, सामान्य मॉडुलन

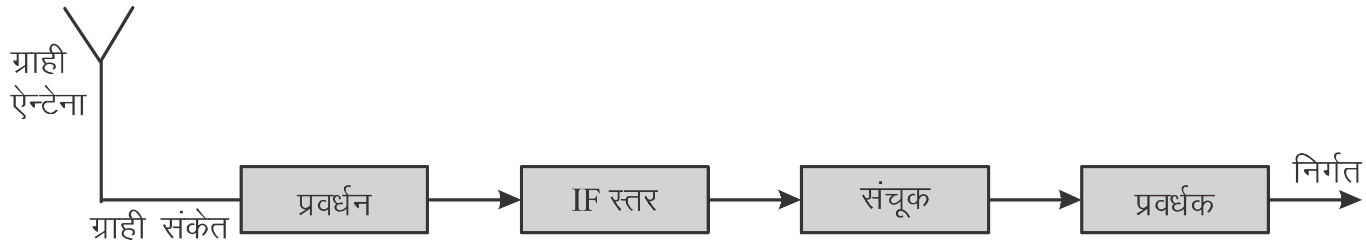
17.7.3 आयाम माडूलन तरंगो का प्रेषण एवं अभिग्रहण (Transmission and Reception of Amplitude Moudlated Waves)

मॉडुलित संकेत को यथावत संचरित नहीं किया जा सकता। मॉडुलेटर (Modulator) को एक शक्ति प्रवर्धक के साथ जोड़ा जाता है जो संकेत को आवश्यक शक्ति प्रदान करता है तथा फिर मॉडुलित (परिवर्तित) संकेत को उपयुक्त आकार के एन्टीना से विकरित किया जाता है जैसा चित्र 17.11 में दर्शाया गया है।



चित्र 17.11 प्रेषित्र का ब्लॉक आरेख

संचरित सूचना चैनल से संचरण के साथ क्षीण हो जाती है। इसीलिये अभिग्राही ऐन्टेना के बाद एक प्रवर्धक तथा एक ससूंचक (डिटेक्टर) लगाया जाता है। साथ ही संसाधन की सुविधा के लिए वाहक आवृत्ति को प्रायः किसी मध्य आवृत्ति (IF) चरण पर ससूंचन से पूर्ण निम्न आवृत्ति में परिवर्तत कर देते हैं। संसूचित संकेत इतना प्रबल नहीं होता कि इसका सीधे उपयोग किया जा सके तथा इसीलिये इसका प्रवर्धन आवश्यक है। एक प्रारूपी अभिग्राही का ब्लॉक आरेख चित्र 17.12 में दर्शाया गया है।



चित्र 17.12 प्रेषित्र एक ब्लॉक आरेख

उदाहरण 17.4 12 V शिखर मान की एक वाहक तरंग एक संदेश संकेत प्रसारित करने में काम ली जाती है। मॉडुलन संकेत का शिखर मान, ताकि मॉडुलन सूचकांक 75% प्राप्त हो, क्या होगा?

हलः वाहक तरंग का आयाम $A_c = 12V$

मॉडुलन सूचकांक $m = 0.75$

$\because \quad A_m = mA_c = 0.75 \times 12 = 9\text{ V}$

उदाहरण 17.5 आयाम मॉडुलन के पश्चात वाहक तरंग का आयाम 5 V व 2 V के मध्य होता है। मॉडुलन की गहराई है?

हलः यहाँ $A_m = 5V$ तथा $A_{\min} = 2V$

मॉडुलन सूचकांक $m = \dfrac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} = \dfrac{5-2}{5+2} = \dfrac{3}{7}$

या $\quad m = \dfrac{3}{7} \times 100\% = 42.8\%$

17.8 नैनोतकनीकी (Nanotechnology)

नैनोविज्ञान तकनीकी विज्ञान की वह शाखा है जिसमें 100 nm से छोटी वस्तुओं का अध्ययन किया जाता है। मानव का बाल लगभग 60000 से 80000 nm मोटाई का होता है इससे हम नैनोतकनीकी की सूक्ष्मता का आभास कर सकते है। वैज्ञानिकों ने नैनो आकार के विभिन्न कण एवं पतली फिल्मों की खोज की है जिनके गुण उसी वस्तु के स्थूल आकार गुण से भिन्न है। इन नैनो कणों एवं फिल्मों आदि से बेहतर संरचना, उपकरण एवं पदार्थ बनाए जाने की अन्तहीन संभावनाएँ है। नैनोतकनीकी में निम्न तीन गुणों का समावेश माना गया है–

1. 100 nm या उससे कम का आकार।
2. सूक्ष्म आकार के कारण अद्वितीय गुण।
3. संरचना एवं गुणों पर नैनो मीटर स्केल तक नियंत्रण।

प्रकृति में नैनो संरचना के अनेक उदाहरण है जैसे उत्प्रेरक, सरन्ध्री कण, कुछ विशेष खनिज आदि जिनमें नैनो स्तर पर भिन्न गुण पाए गए है। पिछले दशक में नैनोतकनीकी के क्षेत्र में हुए नवाचरों से इन संरचनाओं को समझ कर इनके गुणों को नियंत्रित कर नए क्रियात्मक अभियंत्रिक पदार्थ (functional enginnered materials) एवं युक्तियाँ (devices) बनाना सभंव हो रहा है।

नैनो तकनीकी के क्षेत्र में पिछले 40 वर्षों में नैनो एवं माइक्रो लिथोग्राफी (Lithography) की तकनीक विकसित हुई है। यह तकनीक माइक्रो–इलेक्ट्रोनिकी क्रान्ति की जनक बनी है। इस तकनीक से ऐसे जटिल माइक्रो प्रोसेसर बनाए गए है जिनमें कई करोड़ नैनो संरचनाओं का समावेश किया गया है जिसके कारण इन माइक्रो–प्रोसेसर का आकार घटते हुए इनकी दक्षता कई सौ गुना बढ़ी है। पिछले कुछ वर्षो में नैनो तकनीक से सूक्ष्म यान्त्रिकी, सूक्ष्म प्रकाशीय युक्तियाँ भी बनाई गई है।

नैनो तकनीकी की एक अन्य शाखा आणविक एवं रसायनिक तकनीकी है जिसमें परमाणुओं के रसायनिक गुणों पर नियत्रंण का कार्य चल रहा है जिससे अनेक उपभोक्ता उत्पादनों में वांछनीय परिवर्तन की संभावनाएँ प्रबल हुई है।

17.8.1 प्रकृति में नैनो संरचनाएँ (Nano Structures in Nature)

यदि हम अपने निकट पौधों एवं जन्तुओं का सूक्ष्मता से प्रेक्षण करे तो पाएंगे कि इनमें नैनो स्तर पर कुछ विशेषताएँ है इनके कुछ उदाहरण इस प्रकार है–

1. कीटो की आँख पर बहुत छोटे–छोटे उभार होते है जो षटकोणीय आकार के कुछ सौ नैनोमीटर लम्बे होते है इनका आकार दृश्य प्रकाश (380–780 nm) से छोटा है इसलिए इनकी आँखों के द्वारा दृश्य प्रकाश की परावर्तकता बहुत कम होती है और ये कीट अधिक प्रकाश अवशोषित करने के कारण मनुष्य के मुकाबले अल्प प्रकाश में बेहतर देख पाते है। वैज्ञानिकों ने इसी प्रकार की नैनो संरचना बनाई है जो अधिक अवरक्त प्रकाश को अवशोषित कर सकती है। इन संरचनाओं को थर्मो–वोल्टाईक सैल में उपयोग कर इसकी दक्षता बढ़ाई जा सकती है।

3. तितली के पंखों पर बहुपरतीय नैनो पैर्टन होते है। ये संरचनाएँ प्रकाश को फिल्टर कर एक विशेष तरंग दैर्ध्य वाले प्रकाश को

परावर्तित कर देती है। तितली के पंखों की नैनो संरचना का आकार दृश्य प्रकाश की तरंग दैर्ध्य की कोटि का होता है इसी कारण इसकी बहुपरतीय सतह पर प्रकाशीय व्यतिकरण होता है। वैज्ञानिक इस परिघटना को प्रकाश के रंगो की विवेचना में उपयोग कर रहे है।

3- , Mys okbl (Edelweiss) एक अल्पाइन (Alpine) पादप है जो उच्च पर्वततीय क्षेत्रों में पाया जाता है जहाँ पराबैंगनी विकिरण अधिकता में पाए जाते है। इस पादप का पुष्प 100 से 200 nm के नैनो आकार के खोखले तन्तुओं से ढ़का होता है जो उसके आकार की पराबैंगनी किरणों को अवशोषित कर दृश्य प्रकाश को परावर्तित करता है जिस कारण यह सफेद रंग का नजर आता है। इन्हीं नैनो संरचना के कारण पुष्प का उच्च ऊर्जा विकिरण से बचाव होता है। इसके आधार पर वैज्ञानिकों द्वारा उच्च ऊर्जा विकिरण से होने वाली हानियों को रोकने वाली युक्तियों को बनाया जा रहा है।

17.8.2 नैनो संरचनाओं का प्रेक्षण (Observations of Nano Structures)

नैनो संरचनाओ के अध्ययन के लिए सामान्य सूक्ष्मदर्शी उपयुक्त नहीं है। इन संरचनाओं के अध्ययन के लिए कुछ जटिल उपकरण उपयोग में लाते है। इनमें कुछ प्रमुख है–

(i) प्रकाशीय सूक्ष्मदर्शी (Optical Microscope)

इस प्रकार के सूक्ष्मदर्शी के द्वारा लगभग 250 nm तक की संरचनाओं का अध्ययन किया जा सकता है जो कि वास्तविक नैनो संरचना से काफी अधिक है। यही इस सूक्ष्मदर्शी की सीमा है।

(ii) इलैक्ट्रोन सूक्ष्मदर्शी (Electron Microscope)

इस प्रकार के सूक्ष्मदर्शी में दृश्य प्रकाश के स्थान पर इलैक्ट्रोन पुँज का उपयोग किया जाता है जिससे कुछ नैनोमीटर तक की संरचना का अध्ययन संभव है।

(iii) स्केनिंग प्रोब सूक्ष्मदर्शी (Scaning Probe Microscope)

इस प्रकार के सूक्ष्मदर्शी की सतह पर एक भुजा के सिरे पर अत्यन्त महीन प्रोब लगी होती है जिसकी गति से 1 nm तक की संरचना का अध्ययन संभव होता है।

ठोस अवस्था भौतिकी, रसायन विज्ञान विद्युत अभियान्त्रिकी, जैव रसायनिकी सहित विज्ञान की लगभग सभी शाखाओं में नैनो तकनीकी महत्वपूर्ण शोध का विषय है। आगामी वर्षों में इस तकनीकी क्रान्ति से हमारी अर्थ व्यवस्था एवं जीवन शैली पर गहरा प्रभाव पड़ेगा।

महत्वपूर्ण बिन्दु (Important Points)

1. **विस्थापन धारा:** किसी बन्द परिपथ में विद्युत फ्लक्स में परिवर्तन को दर की विस्थापन धारा कहते है। मैक्सवेल ने इसे एम्पियर नियम में संशोधन पद के रूप में दिया था।

$$I_d = \varepsilon_0 \frac{d\int \phi_E}{dt}$$

2. **मैक्सवेल समीकरण (वायु या निर्वात में):** मैक्सवेल की चार मूल समीकरणे है

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{A} = \frac{q}{\varepsilon_0} \qquad \oint \vec{B}\cdot d\vec{A} = 0$$

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{\ell} = \frac{-d\phi_B}{dt} \qquad \oint \vec{B}\cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I + \mu_0\varepsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$$

3. त्वरित आवेश से विद्युत चुम्बकीय तरंगो की उत्पत्ति होती है जिनके संचरण के लिए किसी माध्यम की आवश्यकता नहीं होती है।

4. **विद्युत चुम्बकीय तरंगो के गुण:–**

(i) विद्युत चुम्बकीय तरंग से युग्मित विद्युत व चुम्बकीय क्षेत्र सदिश परस्पर लम्बवत् कम्पन करते है एवं तरंग संचरण की दिशा $\vec{E}\times\vec{B}$ की दिशा में होती है।

(ii) निर्वात में इनका वेग $c = 3\times10^8$ m/s होता है एवं n अपवर्तनांक के माध्यम में वेग $v = \frac{c}{n}$ होता है जहाँ $n = \sqrt{\mu_r \in_r}$ है।

(iii) विद्युत चुम्बकीय तरंग में ऊर्जा विद्युत एवं चुम्बकीय क्षेत्र में समान रूप से विभक्त होती है। किसी क्षण ऊर्जा घनत्व

$$u = u_E + u_B \text{ जहाँ } \left(u_E = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2;\ u_B = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0} \text{ एवं } u_c = u_B\right)$$

(iv) विद्युत चुम्बकीय तरंगों का संवेग $p = \frac{U}{c}$ (U = कुल स्थानान्तरित ऊर्जा) होता है। पूर्णतः अवशोषित सतह पर इनके कारण दाब $p = \frac{I}{c}$ तथा पूर्णतः परावर्तक सतह के लिए $p = \frac{2I}{c}$ होता है।

5. **विद्युत चुम्बकीय तरंग स्पैक्ट्रमः** आवृत्ति (तरंग दैर्ध्य) के आधार पर विद्युत चुम्बकीय तरंगों के स्पैक्ट्रम को निम्नानुसार वर्गीकृत कया है
(i) रेडियो तरंगे (ii) सूक्ष्म तरंगे (iii) अवरक्त तरंगे (iv) दृश्य प्रकाश
(v) पराबैंगनी तरंगे (vi) X किरणे (vii) गामा किरणे

6. **विद्युत चुम्बकीय तरंगो का संचरण–** विद्युत चुम्बकीय तरंगे मूलदः तीन प्रकार से संचरित होती है
(i) भूतरंग संचरण (ii) आकाश तरंग संचरण (iii) व्योम तरंग संचरण

7. **संचार तन्त्रः** एक व्यक्ति या युक्ति से दूसरे व्यक्ति या युक्ति तक सूचना या संकेत का संचरण, संचार कहलाता है। संचार तन्त्र के तीन मूल अवयव प्रेक्षक, माध्यम या चैनल तथा अभिग्राही होते है।

8. **माँडूलनः** निम्न आवृत्ति संकेतो को उच्च आवृत्ति वाहक तरंगो पर अध्यारोपित करने की तकनीक को माँडूलन कहते है। अनालोग माँडूलन तीन प्रकार के होते है
(i) आयाम माँडूलन (ii) आवृत्ति माँडूलन (iii) कला माँडूलन

9. माँडूलन की आवश्यकता के मूल कारण है
(i) ऐंटना का आकार (ii) ऐंटना द्वारा प्रभावी शक्ति विकिरण (iii) विभिन्न संकेतो का मिश्रण

10. आयाम माँडूलित संकेत में वाहक आवृत्ति ω_c के साथ $\omega_c - \omega_m$ एवं $\omega_c + \omega_m$ आवृत्तियाँ होती है। आयाम माँडूलन सूचकांक $m = \frac{A_m}{A_c}$ होता है।

11. **नैनोतकनीकी** 100 nm से छोटी वस्तुओं के अध्ययन की तकनीक नैनोतकनीकी कहलाती है। नैनोतकनीकी से उच्च दक्षता के बेहतर उपकरण एवं पदार्थ बनाए जा सकते है।

अभ्यासार्थ प्रश्न

बहुचयनात्मक प्रश्न

1. विद्युत चुम्बकीय तरंग में औसत ऊर्जा घनत्व सम्बंधित होता है
(अ) केवल विद्युत क्षेत्र से
(ब) केवल चुम्बकीय क्षेत्र से
(स) विद्युत तथा चुम्बकीय क्षेत्रों दोनों से बराबर
(द) औसत विद्युत घनत्व शून्य होता है

2. दूरसंचार से संबंधित तरंगे होती हैं
(अ) अवरक्त (ब) दृश्य प्रकाश
(स) सूक्ष्म तरंग (द) पराबैंगनी किरण

3. विद्युत चुम्बकीय तरंगें परिवहन नहीं करती है
(अ) ऊर्जा (ब) आवेश
(स) संवेग (द) सूचना

4. यदि $\vec{E}$ तथा $\vec{B}$ एक विद्युत चुम्बकीय तरंग के विद्युत एवं चुम्बकीय क्षेत्र सदिश है तो विद्युत चुम्बकीय तरंग का संचरण किस के अनुदिश है
(अ) $\vec{E}$ के (ब) $\vec{B}$ के
(स) $\vec{E} \times \vec{B}$ के (द) $\vec{E} \cdot \vec{B}$ के

5. निम्न में से कौन से विकिरण की तरंग दैर्ध्य न्यूनतम होती है
(अ) X-किरणें (ब) γ-किरणें
(स) β-किरणें (द) α-किरणें

6. विद्युत चुम्बकीय तरंगों के गुणधर्म के बारे में कौनसा कथन गलत है?
(अ) विद्युत व चुम्बकीय क्षेत्र सदिश एक ही समय व स्थान पर अधिकतम व न्यूनतम मान ग्रहण करते है
(ब) विद्युत चुम्बकीय तरंगों में ऊर्जा विद्युत व चुम्बकीय सदिशों में समान रूप से विभाजित होती है
(स) विद्युत व चुम्बकीय दोनों सदिश एक दूसरे के समान्तर होते है व तरंग संचरण की दिशा के लम्बवत् होते है
(द) इन तरंगों को किसी पदार्थ माध्यम की आवश्यकता नहीं होती

7. किसके लिए भू तरंगे सम्भव है
(अ) लघु परास पर कम रेडियो आवृत्ति
(ब) लघु परास पर उच्च रेडियो आवृत्ति
(स) दीर्घ परास पर कम रेडियो आवृत्ति
(द) लघु परास पर निम्न रेडियो आवृत्ति

8. एक TV टावर की ऊँचाई h मीटर है। यदि पृथ्वी की त्रिज्या R मीटर है, तब TV प्रसारण के द्वारा घेरा गया क्षेत्रफल (यदि $h < R$)

(अ) πR^2 (ब) πh^2

(स) $2\pi Rh$ (द) πRh

9. संचरण के किस तरीके के द्वारा रेडियों तरंगों को एक स्थान से दूसरे स्थान पर भेजा सकता है?

(अ) भू तरंग संचरण (ब) आकाश तरंग संचरण

(स) अन्तरिक्ष तरंग संचरण (द) ये सभी

10. एक आयाम माडुलित तरंग में अधिकतम आयाम 10 V व न्यूनतम आयाम 2 V है। मॉडुलन सूचकांक m है।

(अ) 2 / 3 (ब) 1 / 3

(स) 3 / 4 (द) 1 / 5

11. अति मॉडुलित (Over modulated) तरंग का मॉडुलेशन गुणांक है

(अ) 1 (ब) शून्य

(स) <1 (द) >1

अतिलघूत्तरात्मक प्रश्न

1 विद्युत चुम्बकीय तरंगे निर्वात् में किस वेग से गमन करती हैं?

2 विद्युत चुम्बकीय तरंगों के लिये आयनमंडल के अपवर्तनांक पर पृथ्वी तल से ऊँचाई बढ़ने पर क्या प्रभाव पड़ता है?

3 X-दिशा में संचरित विद्युत चुम्बकीय तरंग के $\vec{E}$ सदिश के कंपन Y-अक्ष के समान्तर हैं तो $\vec{B}$ सदिश के कम्पन किस अक्ष के समान्तर होंगे?

4 ***अधिक दूरी तक संचरण के लिये किस विधि का उपयोग किया जाता है?***

5 व्योम तरंगों द्वारा दूरस्थ स्थानों तक संकेतों के प्रसारण हेतु आवृत्ति सीमायें क्या हैं?

6 संचार तंत्र का वह भाग क्या कहलाता है, जो संदेश को संचार चैनल पर संचरित होने योग्य परिवर्तित कर अभिग्राही को प्रेषित करता है?

7 सूचना संकेत को वाहक तरंगों पर अध्यारोपित करने की प्रक्रिया क्या कहलाती है?

8 नैनेतकनीकी में किसी आकार की वस्तुओं का अध्ययन किया जाता है?

लघूत्तरात्मक प्रश्न

1 विद्युत चुम्बकीय स्पेक्ट्रम के घटकों के नाम बताते हुए तरंगदैर्ध्य के क्रम में लिखिये।

2 विद्युत चुम्बकीय तरंगों के चार मुख्य गुण लिखिये।

3 भू–तरंगों तथा व्योम तरंगों को समझाइये।

4 संचार तंत्र किसे कहते हैं?

5 संचार तंत्र में कितने और कौन–कौन से भाग होते हैं?

6 मॉडुलन को समझाइये।

7 नैनो संरचना के प्रेक्षण के लिए प्रयोग किए जाने वाले उपकरणो के नाम दीजिए।

निबन्धात्मक प्रश्न

1 विद्युतचुम्बकीय तरंगों की क्या प्रकृति होती है? विद्युतचुम्बकीय तरंगों से सम्बन्धित हर्टज के प्रयोग का वर्णन कीजिये।

2 विद्युतचुम्बकीय तरंगों के विभिन्न घटकों को वर्णन करते हुये इनके गुणों का उल्लेख कीजिये।

3 मॉडुलन व विमॉडुलन की प्रक्रिया समझाइये। यह किस प्रकार संदेश संचरण में उपयोग में लाये जाते हैं?

4 आयाम मॉडुलन, आवृत्ति मॉडुलन व कला मॉडुलन का सचित्र वर्णन कीजिये।

5 प्रकृति में प्रेक्षित नैनोतकनीक के उदाहरणों को समझाइये।

उत्तरमाला (बहुचयनात्मक प्रश्न)

1. (स) 2. (स) 3. (अ) 4. (स) 5. (ब) 6. (स)
7. (अ) 8. (स) 9. (द) 10. (अ) 11. (द)

अतिलघूत्तरात्मक प्रश्न

1. प्रकाश के वेग $c = 3\times10^8$ m/s

2. अपवर्तनांक में कमी होती है।

3 Z-अक्ष के समान्तर

4 व्योम तरंग संचरण विधि

5 रेडियो तरंगे 1.5 MHz से 30 MHz आवृत्ति की

6 प्रेषित्र

7 मॉडुलन

8 100 nm से छोटी

आंकिक प्रश्न

1 X-दिशा में संचरित समतल ज्यावक्रीय विद्युत चुम्बकीय तरंग के E सदिश का अधिकतम मान किसी क्षण किसी बिन्दु पर 600 वोल्ट/मीटर है। इस बिन्दु पर चुम्बकीय क्षेत्र का मान ज्ञात कीजिये। प्रकाश का वेग $= 3\times10^8$ m/s

(उत्तर $= 2\times10^{-6}$ Web/m^2)

2 एक दूरदर्शन मीनार की ऊँचाई 75 m है। किस महत्तम दूरी व क्षेत्रफल में यह दूरदर्शन संचरण प्राप्त किया जा सकता है? पृथ्वी की त्रिज्या $= 6.4\times10^6$ m

(उत्तर 31 km, 3014 km^2)