

Електромагнитни вълни – основни характеристики, вълново уравнение. Скала на електромагнитните вълни

Електромагнитни вълни – основни характеристики, вълново уравнение

Явлението електромагнитна индукция показва, че променливото магнитно поле поражда електрично поле. Максвел предполага, че променливото електрично поле също така може да породи магнитно поле. Тъй като магнитното поле се създава от токове, променливото електрично поле трябва да е свързано с промяна на зарядите в някаква област от пространството, а тази промяна на заряда е еквивалентна на протичане на някакъв ток. Този ток, породен от промяната на електричното поле, Максвел нарича ток на отместване.

Въвеждането на тока на отместване от една страна възстановява симетрията между електричното и магнитното поле (електрично поле може да се породи от заряди или от промяна на магнитното поле, а магнитно – от токове или промяна на електричното поле), а от друга – дава възможност да се дефинира един нов обект – електромагнитно поле, който показва неразривната връзка между електричното и магнитното поле. Променливото магнитно поле поражда променливо електрично поле, то, от своя страна, поражда променливо магнитно поле и т.н. – следователно в пространството се поражда електромагнитно поле, което се характеризира с интензитета E на електричното поле и индукцията B (или интензитета H) на магнитното поле, които, са взаимно перпендикулярни. При този процес се извършва непрекъснато преобразуване на енергията на електричното поле в енергия на магнитното поле и обратно. Електромагнитното поле може да се опише с четири основни уравнения, наречени уравнения на Максвел, които по същество представляват обобщение на теоремите за циркулацията на електричното и магнитното поле и законите на Гаус за електричното и магнитното поле. За среда с постоянни електрични и магнитни свойства ($\epsilon_r = \text{const}$; $\mu_r = \text{const}$) уравненията на Максвел в интегрална форма имат вида:

$$\begin{aligned}(1) \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} &= -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = -\mu_0 \mu_r \int_S \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \cdot d\vec{S}; \\(2) \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \mu_0 \mu_r I_c + \mu_0 \epsilon_0 \mu_r \epsilon_r \frac{\partial \Phi_E}{\partial t} \Rightarrow \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} + \epsilon_0 \epsilon_r \int_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{S}; \\(3) \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r} \int_V \rho dV; \\(4) \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} &= 0 \Rightarrow \oint_S \vec{H} \cdot d\vec{S} = 0.\end{aligned}$$

При преобразуване на уравненията (1÷4) са използвани определения за електричен и магнитен поток Φ_E и Φ_B , плътност на тока j и плътност на зарядите ρ , както и връзката между интензитета на магнитното поле H и магнитната индукция B за среда, която не е феромагнитна:

$$\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}; \quad \Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}; \quad I_c = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}; \quad q = \int_V \rho dV; \quad B = \mu_0 \mu_r H.$$

Като се използват интегралните теореми на Стокс ($\oint_L \vec{A} \cdot d\vec{l} = \int_S \text{rot } \vec{A} \cdot d\vec{S}$) и на Остроградски – Гаус ($\oint_S \vec{A} \cdot d\vec{S} = \int_V \text{div } \vec{A} dV$), уравненията (1÷4) може да се преобразуват в т.нар. диференциална форма, която е по-удобна за конкретни пресмятания на параметрите на полето:

$$\begin{aligned}(5) \text{rot } \vec{E} &= -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}; \\(6) \text{rot } \vec{H} &= \vec{j} + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}; \\(7) \text{div } \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r}; \\(8) \text{div } \vec{H} &= 0.\end{aligned}$$

Пресмятанията се опростяват значително ако средата, в която е породено и се разпространява електромагнитното поле, е неутрална ($\rho = 0$) и непроводяща ($j = 0$). В този случай уравненията (5÷8) придобиват още по-симетричен вид:

$$(9) \operatorname{rot} \vec{E} = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \vec{H}}{\partial t};$$

$$(10) \operatorname{rot} \vec{H} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t};$$

$$(11) \operatorname{div} \vec{E} = 0;$$

$$(12) \operatorname{div} \vec{H} = 0.$$

Оказва се, че преобразуването на уравнения на Максвел довежда до вълнови уравнения за двата вектора $\vec{E}$ и $\vec{H}$. Напр. ако приложим диференциалния оператор ротация (rot) към двете страни на (9), като имаме предвид и (10), ще се получи:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{E}) = \operatorname{rot} \left(-\mu_0 \mu_r \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{rot} \vec{H} = -\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}.$$

От друга страна $\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{E}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \vec{E}) - \operatorname{div}(\operatorname{grad} \vec{E}) = 0 - \Delta \vec{E} = -\Delta \vec{E}$, като се има предвид (11). Така се получава:

$$(13) \Delta \vec{E} = \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}.$$

Ако приложим същата процедура към (10), ще получим за $\vec{H}$:

$$(14) \Delta \vec{H} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}.$$

Получените уравнения (13) и (14) са диференциални вълнови уравнения. В такъв случай решенията на (13) и (14) трябва да описват някаква вълна с фазова скорост:

$$(15) v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon_r \mu_r}}.$$

Тази вълна Максвел нарича електромагнитна вълна.

Следователно електромагнитната вълна представлява електромагнитно поле, което се разпространява в пространството със скорост v (15). Основните характеристики на електромагнитната вълна са векторите на интензитетите на електричното и магнитното поле, които се променят периодично и винаги са взаимно перпендикулярни: $\vec{E} \perp \vec{H}$. Посоката на разпространение на електромагнитната вълна е перпендикулярна и на двата вектора, т.е. електромагнитната вълна е напречна вълна. Основната разлика между електромагнитните и еластичните вълни е, че при електромагнитната вълна се променят периодично интензитетите на електричното и магнитното поле, т.е. характеристиките на самата вълна, а не както при еластичната вълна – положенията на частици от средата. Затова електромагнитните вълни могат да се разпространяват и във вакуум, а еластичните не могат.

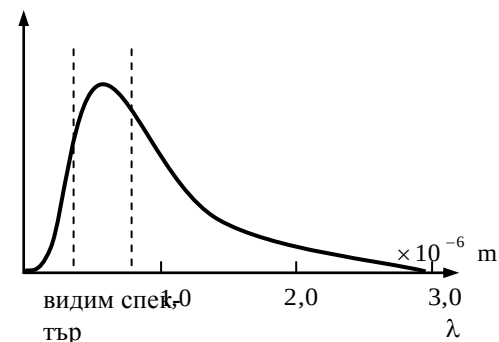
Скала на електромагнитните вълни

Електромагнитните вълни имат твърде широк диапазон от честоти. Обикновено те се класифицират по дължината на вълната и се разделят на няколко области:

- Диапазон на дългите радиовълни (**$10^4 \div 10^2$ m**); използва се най-много за радиовръзки. Основният недостатък на разглежданите радиовълни се дължи на факта, че йоносферата (въздушният слой с повишена концентрация на заредени частици, който има височина **$100 \div 300$ km** над земната повърхност) ги поглъща. По тази причина те не са ефективни за радиовръзка на големи разстояния. Използват се повече за радиовръзки в подводния флот.
- Диапазон на средните и късите радиовълни (**$10^2 \div 10$ m**); използва се основно за радиосъобщения. За разлика от дългите вълни тези вълни се отразяват от йоносферата. Вследствие на многократно отражение от нея те могат да обходят земното кълбо и да осигурят далечна радиовръзка.
- Метров диапазон (**$10 \div 1$ m**); използва се за телевизия и радиолокация. В телевизията е необходимо да се предават на големи разстояния не само звукови сигнали, но и изображения. Всяко изображение посредством фотоелектронен преобразувател се превръща в редица от електрични сигнали. Вълните от този диапазон се разпространяват добре през йоносферата и не се връщат към повърхността на Земята. Поради това, за да се увеличи разстоянието на телепредаванията, излъчвателите на телевизионните станции трябва да се поставят на много високи места (телевизионни кули). В днешно вре-

ме на специално избрани околоземни орбити се изпращат спътници, които постоянно се намират над определени райони и служат за ретрансляция на телевизионните предавания.

- Сантиметров диапазон ($1 \div 10^{-2} \text{ m}$); използват се в авиацията за точна и близка радиолокация. Вълните от сантиметровия диапазон се поглъщат силно от веществото, поради което са удобни за изучаване на неговите свойства.
- Милиметров (микровълнов) диапазон ($10^{-2} \div 10^{-3} \text{ m}$); използва се за точна радиолокация и за научни цели. При изучаване поглъщането на микровълните от многоатомните молекули се получава информация за строежа им. С помощта на този метод неотдавна е открито, че в Космоса съществуват не само прости молекули като амоняк, водород и др., но и молекули на сложни съединения – аминокиселини. Общият брой на откритите сложни молекули достига около **200**.
- Инфракчервен диапазон ($10^{-3} \div 10^{-6} \text{ m}$); използва се при изучаване вътрешната структура на веществата – определяне вида на взаимодействието между молекулите, характера на движението на ядрата в атомите и др.
- Видима светлина ($7.5 \times 10^{-7} \div 4 \times 10^{-7} \text{ m}$); – електромагнитните вълни, които се възприемат от зрителния орган на човека, и включва цялата информация, която той получава за заобикалящия го свят. Спектърът на видимата светлина е показан на фиг. 2.
- Ултравиолетов диапазон ($4 \times 10^{-7} \div 10^{-7} \text{ m}$); тези вълни имат способността да въздействат много силно на веществото. Поради силното си взаимодействие с веществото ултравиолетовото излъчване на Слънцето се поглъща почти напълно (**99%**) от атмосферата и по този начин се предпазва Земята.
- Диапазон на рентгеновите лъчи и гама-лъчите ($\lambda < 10^{-7} \text{ m}$); рентгеновото излъчване се използва в медицината за рентгенова диагностика, а в техниката за откриване на различни дефекти в материалите (рентгенова дефектоскопия). Гама-лъчите поради голямата си проникваща способност ($f > 10^{20} \text{ Hz}$) намират приложение за изследване структурата на ядрата.



фиг. 1