

电磁波的起伏传播¹

段恒毅

(国营锦江电机厂一所 成都 610051)

摘 要 本文提出了电磁波传播的起伏传播方式概念及其由具有时变初旋转相位角的多频圆极化辐射源形成的起伏传播的工作原理,并介绍了起伏传播的一些特点.这种新传播方式异于我们过去熟悉的均匀传播方式的最大特点是沿途电磁波分布的起伏变化,而这一特点将使得起伏传播在诸如定点通讯、探测、微波送电等许多传统的电磁波应用方面获得应用.

关键词 电磁波,圆极化,起伏传播,多频辐射,时变初旋转相位角

中图分类号 TN011

1 引 言

均匀传播是大家熟悉的一种电磁波传播方式,其特点是:从辐射源辐射出来的电磁波沿传播路径强度均匀地向外传播.而起伏传播与此相反,电磁波在传播途中强度沿传播路径稳定地起伏变化.

由不少于两个频率合成的、且其初始旋转相位角分别随时间变化的的多频圆极化辐射源是实现起伏传播的必要条件.下面我们就来具体地探讨这种起伏传播的工作原理及其实现方法.

2 起伏传播的基本原理

设在空间同一点上两个圆极化点源,分别辐射出频率为 ω^+ 、 ω^- 且旋向相同等幅的圆极化电磁波.同时我们还假设这两个辐射源本身分别同时以 α 和 $-\alpha$ 的角度反向旋转,这里 α 是时间的函数.此时,这两个源辐射的电场可写成

$$E^+ = [E_0/(2r)][\hat{x} \sin(\omega^+ t - k^+ r + \alpha) + \hat{y} \cos(\omega^+ t - k^+ r + \alpha)], \quad (1a)$$

$$E^- = [E_0/(2r)][\hat{x} \sin(\omega^- t - k^- r - \alpha) + \hat{y} \cos(\omega^- t - k^- r - \alpha)], \quad (1b)$$

式中“+”代表相对频率较高的那列电磁波,而“-”代表相对频率较低的那列电磁波. E 为电场场强. r 是从源点到场点的距离.

如果 (1) 式中满足

$$\alpha = (\omega^+ - \omega^-)t/2 + C + 2m\pi, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (2)$$

(式中 C 为一绝对值小于 π 的实常数,称为初始旋转相位角常数),那么 (1) 式的两列圆极化波在传播途中的合成场为

$$E = (E_0/r) \cos(\Delta k r/2) [\hat{x} \sin(\omega_0 t - k_0 r + C) + \hat{y} \cos(\omega_0 t - k_0 r + C)], \quad (3)$$

¹ 1995-06-07 收到, 1996-03-05 定稿

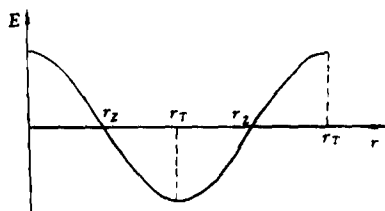


图 1 双频起伏传播的路径函数

式中

$$\omega_0 = (\omega^+ + \omega^-)/2, \quad k_0 = (k^+ + k^-)/2, \quad \Delta k = k^+ - k^-.$$

此乃一频率为 ω_0 幅度被距离函数调制的起伏传播状态的圆极化波。式中的距离调制函数我们称之为该起伏传播的传播路径函数。由于形成起伏传播至少要有两个频率的辐射波, 因此我们将满足起伏传播条件的这样两列异频辐射波称之为起伏传播的一组基本双频辐射单元。

从 (3) 式可知, 起伏传播状态的电磁波频率为其基本双频辐射源各频率的算术平均值。另外由双频辐射产生的起伏传播的路径函数 (图 1) 为一三角函数, 其最小周期距离 L_p 为

$$L_p = 2\pi v / \Delta\omega \quad (4)$$

式中 v 为电磁波的传播速度。由 (4) 式可以看到, 起伏传播的路径函数的周期与双频辐射波本身的频率无关, 仅与其频差相关。路径函数的极值点到源点距离为

$$r_T = 2m\pi v / \Delta\omega \quad (5a)$$

零点到源点距离为

$$r_Z = (2m+1)\pi v / \Delta\omega \quad (5b)$$

虽然起伏传播的路径函数是周期函数, 即其极值点、零点随路径周期性重复, 但考虑到电磁波传播的空间衰减, 各极值点处的场强值实际并不相等, 距离源点越远的极值点处的场强值越小。

由基本双频辐射源形成的起伏传播, 其路径函数为一余弦函数。在实际中, 可能还需要有其它形式的路径函数。这样就需要有若干组频率彼此不同的基本双频辐射单元合成的多频辐射源。我们假设有一个由 $(2N+1)$ 个频率组合而成的多频辐射源, 其各频点的辐射场为

$$E_i^+ = [E_0 i / (2r)] [\hat{x} \sin(\omega_i^+ t - k_i^+ r + \alpha_i) + \hat{y} \cos(\omega_i^+ t - k_i^+ r + \alpha_i)], \quad (6a)$$

$$E_i^- = [E_0 i / (2r)] [\hat{x} \sin(\omega_i^- t - k_i^- r - \alpha_i) + \hat{y} \cos(\omega_i^- t - k_i^- r - \alpha_i)], \quad i = 0, 1, 2, \dots, N. \quad (6b)$$

其合成场为

$$E = \sum_{i=0}^N (E_{0i} / r) \cos(\Delta k_i r / 2) [\hat{x} \sin(\omega_0 t - k_0 r + C) + \hat{y} \cos(\omega_0 t - k_0 r + C)], \quad (7)$$

式中

$$\omega_0 = (\omega_i^+ + \omega_i^-) / 2, \quad k_0 = (k_i^+ + k_i^-) / 2, \quad \Delta k_i = k_i^+ - k_i^-.$$

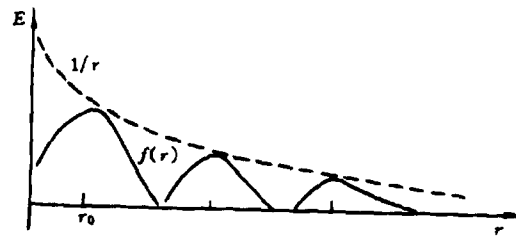


图 2 路径函数具有任意函数形状的起伏传播

若其合成场的路径函数为一周期为 L_P ，且在 $[-L_P/2, L_P/2]$ 上至多只有有限个第一类间断点及极值点的任意函数 $f(r)$ ，将该函数展成傅氏级数

$$f(r) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \cos 2i\pi r/L_P, \quad (8)$$

令

$$E_{0i} = A_i, \quad \Delta k_i = i4\pi/L_P. \quad (9)$$

当 N 足够大，由 (7) 式中各项合成的路径函数即具有 $f(r)$ 的形式。图 2 表示路径函数具有任意函数形状的起伏传播。

3 起伏传播系统的设计

起伏传播系统的设计是在给出了系统的路径函数、接收频率、极值点或零点位置的条件下寻求多频辐射源各频率点的频率、相应的时变初始旋转相位角以及各双频辐射单元间的相对功率分布。

对双频辐射，由起伏传播路径函数周期距离及其接收频率可得出双频辐射源各频点的频率分别为

$$\omega^+ = \omega_0 + \pi v/L_P, \quad \omega^- = \omega_0 - \pi v/L_P, \quad (10)$$

而相应的时变初始旋转相位角则由 (2) 式给出。

多频情况与此相同。只是其各基本双频辐射源的相对辐射功率由 (9) 式确定，各频点的频率和相应的时变初始旋转角分别为

$$\omega_i^+ = \omega_0 + i\pi v/L_P, \quad \omega_i^- = \omega_0 - i\pi v/L_P \quad (11)$$

和

$$\alpha_i = -i\pi v/L_P + C_i + 2m\pi. \quad (12)$$

多频辐射源占用的总频带宽度为

$$B_{\Delta\omega} = N2\pi v/L_P. \quad (13)$$

4 起伏传播的起伏性

在电磁波传播理论中，电磁波辐射的方向性是由其天线的辐射方向性函数来表示的。在自由空间里，辐射场的场点场强被认为是除与场点空间位置有关外，还与辐射源的辐射功率及其

辐射方向图有关。如果我们将电磁波辐射的方向性看成是电磁波辐射在方位空间的不均匀, 那么, 用来讨论方向性辐射的办法也可用来讨论起伏传播的起伏性及其场点的场强。

为简单起见, 我们仍然假设起伏传播的多频辐射源为一几何点源。各频点的辐射功率为 $P_i^\pm$, $i = 0, 1, 2, \dots, N$ 。设其路径函数的周期为 L_P , 在一个周期距离的整个空间内散布的所有频率辐射电磁波的总电磁能量为

$$E_g = \frac{L_P}{v} \sum_{i=0}^N (P_i^+ + P_i^-). \quad (14)$$

另外, 我们还假设该起伏传播的路径函数为 $f(r)$ 。由于辐射源是一无方向性的点源, 故其场点场强可写为

$$E = E_0 f(r)/r, \quad (15)$$

式中 $f(r)$ 是取其极大值归一化后的。该起伏场在一个周期距离的整个空间内散布的总的时平均电磁能量为

$$E_g = 2\pi E_0^2 \varepsilon_0 \int_0^{L_P} f^2(r) dr. \quad (16)$$

由 (14)、(16) 式算得的总电磁能量应相等, 即得

$$E_0 = \sqrt{30 L_P \sum_{i=0}^N (P_i^+ + P_i^-) / \int_0^{L_P} f^2(r) dr}. \quad (17)$$

从而由 (15) 式得出场点场强。如果辐射源是有方向性的, 并假设其方向性系数为 D , 则相应的场强公式为

$$E = E_0 f(r) \sqrt{D}/r, \quad (18)$$

$f(r) = 1$, 为均匀传播。由 (17), (18) 式可得均匀传播的场强公式

$$E = \sqrt{30 P D}/r, \quad (19)$$

式中 P 为总辐射功率。并且由 (8) 式知其辐射源仅辐射一个与接收频率相同的电磁波。

我们定义在相同的总辐射功率条件下, 具有相同方向图的辐射源在相同位置点上起伏传播方式的电场强度平方与均匀传播方式的电场强度平方之比为该起伏传播系统在该位置点的起伏系数, 记为 $U(r)$ 。由于起伏传播的不均匀系数与场点至源点的距离有关, 我们将传播路径上极值点处的起伏系数定义为该系统的最大起伏系数, 记为 U 。根据定义, 可得出起伏系数的计算公式:

$$U(r) = L_P f^2(r) / \left[\int_0^{L_P} f^2(r) dr \right], \quad (20)$$

而最大起伏系数

$$U = L_P / \left[\int_0^{L_P} f^2(r) dr \right]. \quad (21)$$

利用 (21) 式算得第 2 节中讨论的双频源形成的具有余弦形式路径函数的起伏传播的最大起伏系数为 2。

5 结束语

过去我们对利用空间进行电磁波投送的有效性考虑是通过天线对电磁波辐射能量在方位空间散布状况的控制来实现的。至于纵向的,即距离空间上的能量散布则基本上没有考虑。但在实际的许多应用中,辐射电磁能量沿传播路径的均匀散布(不考虑空间衰减因子)是没有必要的,有时甚至是有害的。如对定点通讯,散布于收发两地之间的辐射电磁能量不仅使接收地电场信号强度降低,而且造成收发两地之间广大区域内的电磁污染。而对此,起伏传播的优越性则是显而易见的,当然起伏传播的有用性远不仅限于此。事实上,起伏传播可用在电磁波传播的几乎所有方面,如电磁波探测,电磁波送电等。

参 考 文 献

- [1] M 波恩, E 沃耳夫. 光学原理. 北京: 科学出版社, 上册, 1978, 335-339.
- [2] H 莫特, 著. 林昌禄等译. 天线和雷达中的极化. 成都: 电子科技大学出版社, 1989, 69-76.
- [3] 王元坤编. 电波传播概论. 北京: 国防工业出版社, 1984, 8-10.

UNDULATING PROPAGATION OF THE ELECTROMAGNETIC WAVE

Duan Hengyi

(Jinjiang Electric Machinery Factory, Chengdu 610051)

Abstract The idea about undulating propagation of electromagnetic wave is presented. And some characters and operating principle to form undulating propagation of electromagnetic wave by multifrequency radiation source with initial twisty phase angle continually varying versus the time are introduced. The electromagnetic wave propagation in the undulating pattern along the propagating path will profit many fields of the electromagnetic wave application, such as point to point communication, electromagnetic energy conveyance, detection and ranging etc.

Key words Electromagnetic wave, Circularly polarization, Undulating propagation, Multifrequency radiation, Initial twisty phase angle varying with time

段恒毅: 男, 1964年生, 高级工程师, 微波天线专业.