

近地面三阵子天线估计电磁波到达角和极化参数*

孙杰^{1)2)†} 张晓娟¹⁾ 方广有¹⁾

1) (中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学, 北京 100190)

(2013年4月9日收到; 2013年6月24日收到修改稿)

从自由空间中的三阵子天线求入射电磁波极角和方位角的基本原理出发, 结合电场各个分量与极化方式之间的关系给出了左手极化波计算波达角的公式, 及地球表面上方三阵子天线判断入射波极化方向的方法; 本文提出了一种新颖的滤除地面反射波的方法, 保证了波达角的求解精度; 利用获得的高精度的波达角和测得的电场强度, 计算出了电磁波的各种极化参数, 这些极化参数可以作为电离层研究和电磁波在电离层中传播研究的参考.

关键词: 地球表面, 三阵子天线, 波达角, 极化参数

PACS: 84.40.-x, 84.40.Xb, 42.25.Ja

DOI: 10.7498/aps.62.198402

1 引言

极化是电磁波的一个重要属性, 短波远距离传输要经过电离层反射, 电离层会改变电磁波的极化参数, 在接收点求出电磁波的极化方式, 则可以反过来研究电离层的结构特点. 文献 [1, 2] 对用多个三阵子天线构成的阵列估计电磁波的方位角和极化参数的性能进行了评价, 并给出了基于最大似然准则和 Stokes 参数的极化状态估计器, 对极化状态进行仿真分析时用了 4 个三阵子天线. 文献 [3] 给出了自由空间中用一个三阵子天线同时求极角和方位角的方法, 文献 [4] 给出了自由空间中求入射电磁波频率的最佳方法, 并分析了在月球表面用一个三阵子天线求波达角的情况, 指出由于月球表面的构成参数与自由空间相近, 故所求波达角与自由空间相比, 有恒定偏差. 由于自由空间中的一个三阵子天线无法分辨反方向共轭极化的入射波, 文献 [3] 只给出了右手极化波的公式, 而文献 [5] 指出三阵子天线只能求出右手极化电磁波的波达角. 本文根据电磁波各个电场分量与极化方式之间的关系, 详尽的讨论了自由空间中单个三阵子天线求波达角的原理, 给出了左手极化入射波求波达角的公式,

阐述了当天线位于地面时极化方向的判断方法; 提出了克服地面反射波影响, 从而保证计算波达角精度的新方法, 并仿真证实了该方法的有效性; 在高精度求解波达角的基础上, 给出了计算极化参数的公式.

2 三阵子天线求波达角的基本原理

根据电磁波理论, 在远场, 自由空间中的电磁波为平面 TEM 波, 其电场构成的极化平面与传播方向垂直, 构造矢量 [3]

$$\begin{aligned} V &= V_x x + V_y y + V_z z \\ &= -2\text{Im}(E_y E_z^* x + E_z E_x^* y + E_x E_y^* z), \end{aligned} \quad (1)$$

经证明 V 平行于波矢量 k . 设入射电磁波的 θ 分量 $E_\theta = \rho E_0 e^{j\eta}$ 其中 $\eta \in (-\Pi, \Pi)$; φ 分量 $E_\varphi = E_0$, 经坐标变换, 直角坐标系下的三个分量为

$$\begin{aligned} E_x &= E_\theta \cos \theta \cos \varphi - E_\varphi \sin \varphi \\ &= \rho E_0 e^{j\eta} \cos \theta \cos \varphi - E_0 \sin \varphi, \\ E_y &= E_\theta \cos \theta \sin \varphi + E_\varphi \cos \varphi \\ &= \rho E_0 e^{j\eta} \cos \theta \sin \varphi + E_0 \cos \varphi, \\ E_z &= -E_\theta \sin \theta = -\rho E_0 e^{j\eta} \sin \theta, \end{aligned} \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(批准号: 61172017)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: sunjief@163.com

其中 $\theta \in (0, \pi)$, $\varphi \in (0, 2\pi)$, 将 (2) 式代入 (1)' 得

$$\begin{aligned} V_x &= -2\text{Im}(E_y E_z^*) \\ &= -2E_\theta E_\varphi \sin \theta \cos \varphi \sin \eta, \\ V_y &= -2\text{Im}(E_z E_x^*) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= -2E_\theta E_\varphi \sin \theta \sin \varphi \sin \eta, \\ V_z &= -2\text{Im}(E_x E_y^*) \\ &= -2E_\theta E_\varphi \cos \theta \sin \eta. \end{aligned} \quad (3)$$

由 (3) 式知

$$\begin{aligned} \theta &= \cos^{-1} \frac{-V_z}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}} \cdot \frac{\sin \eta}{|\sin \eta|} \\ &= \begin{cases} \cos^{-1} \frac{V_z}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}}, & \eta \in (-\pi, 0), \quad \text{左手极化,} \\ \cos^{-1} \frac{-V_z}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}}, & \eta \in (0, \pi), \quad \text{右手极化.} \end{cases} \end{aligned} \quad (4a)$$

又

$$\frac{V_y}{V_x} = \frac{-2E_\theta E_\varphi \sin \theta \sin \varphi \sin \eta}{-2E_\theta E_\varphi \sin \theta \cos \varphi \sin \eta}$$

且 $E_\theta > 0$; $E_\varphi > 0$; $\sin \theta > 0$; $\sin \eta > 0$, $\eta \in (0, \pi)$; $\sin \eta < 0$, $\eta \in (-\pi, 0)$. 有

$$\begin{aligned} \frac{V_y}{V_x} &= \frac{-\sin \varphi \sin \eta}{-\cos \varphi \sin \eta} \\ &= \begin{cases} \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi}, & \eta \in (-\pi, 0), \text{左手极化,} \\ \frac{-\sin \varphi}{-\cos \varphi}, & \eta \in (0, \pi), \text{右手极化.} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

故, 当 $\eta \in (-\pi, 0)$ 左手极化时,

$$\varphi = \begin{cases} \tan^{-1} \frac{V_y}{V_x}, & V_x > 0, V_y > 0, \\ \tan^{-1} \frac{V_y}{V_x} + \pi, & V_x < 0, \\ \tan^{-1} \frac{V_y}{V_x} + 2\pi, & V_x > 0, V_y < 0. \end{cases} \quad (6)$$

当 $\eta \in (0, \pi)$ 右手极化时,

$$\varphi = \begin{cases} \tan^{-1} \frac{V_y}{V_x}, & V_x < 0, V_y < 0, \\ \tan^{-1} \frac{V_y}{V_x} + \pi, & V_x > 0, \\ \tan^{-1} \frac{V_y}{V_x} + 2\pi, & V_x < 0, V_y > 0. \end{cases} \quad (7)$$

当天线接近地面时, 因为入射波的极角必然小于 $\pi/2$, 所以如果用 (4b) 式求出 $\theta \in (0, \pi/2)$, 知必为右手极化波, 则可继续用右手极化公式 (7) 求出 φ ; 若求出 $\theta \in (\pi/2, \pi)$, 知必为左手极化波, 则应当用左手极化公式 (4a) 和 (6) 求解 θ, φ .

3 地球表面上方的三阵子天线求波达角

3.1 两个三阵子天线抑制地面反射波的原理

三阵子天线求波达角的原理是用直达波电场构建与极化平面相垂直的矢量, 当天线近地面时, 地面反射波会对天线接收场强产生很大影响, 且水平轴向与垂直轴向的影响不同, 这样就会对波达角的求解产生严重干扰, 如何去除地面反射波的影响是正确求解波达角的关键. 通常有两种方法来考虑地面的影响, 即反射系数法和理想地面近似法. 本文给出了另一种新颖的去除地面影响的方法—阵列抑制法, 该方法将两个三阵子天线沿与地面垂直的 Z 轴放置, 构成一个天线阵 (如图 1 所示), 从而在自适应的滤除地面的反射波的同时, 增大天线孔径, 具体原理如下所述.

根据平面电磁波理论, 反射角与入射角相等, 则地面反射波入射到天线的极角与直达波的极角互补, 若直达波入射极角为 θ , 则反射波的入射极角为 $\pi - \theta$. 两个沿 Z 轴放置的三阵子天线通过移相, 可以形成在 $\pi - \theta$ 方向为 0 的方向图. 设天线 1 的远场电场为 E_1 , 由于天线 2 的位置比天线 1 高 h_2 , 则由于该距离引起的相位差为 $\frac{2\pi}{\lambda_0} h_2 \cos \theta$ (λ_0 为电磁波在自由空间中的波长); 设两个天线远场辐射场强的初始相位差为 δ , 则第二个天线的远场电场 $E_2 = E_1 e^{j\frac{2\pi}{\lambda_0} h_2 \cos \theta} e^{j\delta}$. 总的远场场强为

$$E = E_1 + E_2 = E_1 \left(1 + e^{j(\frac{2\pi}{\lambda_0} h_2 \cos \theta + \delta)} \right)$$

$$= 2E_1 \cos\left(\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}h_2 \cos\theta + \delta\right)\right) \times e^{j\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}h_2 \cos\theta + \delta\right)},$$

只要总场强在反射波方向为零, 即

$$\cos\left(\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}h_2 \cos(\pi - \theta) + \delta\right)\right) = 0,$$

就可以抑制反射波, 此时 $\delta = \pi + \frac{2\pi}{\lambda_0}h_2 \cos\theta$. 如果

入射波极角 $\theta = 30^\circ$, 波长 $\lambda_0 = 20$ m, $h_2 = \frac{\lambda_0}{10} = 2$ m, 则 $\delta \approx 211.2^\circ$, 此时的远场方向图如图 2 所示. 从图中可以看出方向图在反射波入射极角为 150° 的方向有极小值.

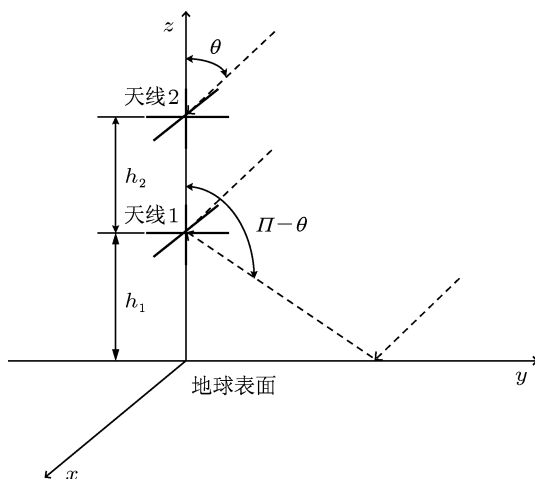


图 1 抑制地面反射波影响的两个三阵子天线的位置关系

3.2 两个三阵子天线抑制地面反射波求波达角的公式

设入射波频率为 f_0 , 采样间隔为 Δt , 形成向量

$$H = [1, e^{j2\pi f_0 \Delta t}, \dots, (e^{j2\pi f_0 \Delta t})^{N-1}]^T;$$

天线 1 的 X, Y, Z 三个阵子上接收的数据分别为 X_1, Y_1, Z_1 , 该处的电场 t_0 时刻在三个轴向的场强为 E_{1x}, E_{1y}, E_{1z} ; 天线 2 的 X, Y, Z 三个阵子上接收的数据为 X_2, Y_2, Z_2 , 该处的电场 t_0 时刻在三个轴向的场强为 E_{2x}, E_{2y}, E_{2z} ; 采样点数均为 N . 由此, 可构成如下的 6 个线性超越方程组:

$$\begin{aligned} X_{1[N,1]} &= H_{[N,1]} E_{1x}, & Y_{1[N,1]} &= H_{[N,1]} E_{1y}, \\ Z_{1[N,1]} &= H_{[N,1]} E_{1z}, & X_{2[N,1]} &= H_{[N,1]} E_{2x}, \\ Y_{2[N,1]} &= H_{[N,1]} E_{2y}, & Z_{2[N,1]} &= H_{[N,1]} E_{2z}. \end{aligned} \quad (8)$$

用最小二乘法解上述方程组, 求出 $E_{1x}, E_{1y}, E_{1z}, E_{2x}, E_{2y}, E_{2z}$, 通过移相, 形成新的滤除反射波的

数据:

$$\begin{aligned} E_x &= E_{1x} + E_{2x} e^{j\delta} = E_{1x} - E_{2x} e^{j\frac{2\pi}{\lambda_0}h_2 \cos\theta}, \\ E_y &= E_{1y} + E_{2y} e^{j\delta} = E_{1y} - E_{2y} e^{j\frac{2\pi}{\lambda_0}h_2 \cos\theta}, \\ E_z &= E_{1z} + E_{2z} e^{j\delta} = E_{1z} - E_{2z} e^{j\frac{2\pi}{\lambda_0}h_2 \cos\theta}. \end{aligned} \quad (9)$$

将 (9) 式代入 (3) 式, 再代入 (4b) 式, 得如下超越方程:

$$\begin{aligned} \cos\theta &= -\text{Im}\left(\left(E_{1x} - E_{2x} e^{j\frac{2\pi}{\lambda_0}h_2 \cos\theta}\right) \times \left(E_{1y} - E_{2y} e^{j\frac{2\pi}{\lambda_0}h_2 \cos\theta}\right)^*\right) \\ &\times \left\{ \text{Im}^2\left(\left(E_{1y} - E_{2y} e^{j\frac{2\pi}{\lambda_0}h_2 \cos\theta}\right) \times \left(E_{1z} - E_{2z} e^{j\frac{2\pi}{\lambda_0}h_2 \cos\theta}\right)^*\right) \right. \\ &+ \text{Im}^2\left(\left(E_{1z} - E_{2z} e^{j\frac{2\pi}{\lambda_0}h_2 \cos\theta}\right) \times \left(E_{1x} - E_{2x} e^{j\frac{2\pi}{\lambda_0}h_2 \cos\theta}\right)^*\right) \\ &+ \text{Im}^2\left(\left(E_{1x} - E_{2x} e^{j\frac{2\pi}{\lambda_0}h_2 \cos\theta}\right) \times \left(E_{1y} - E_{2y} e^{j\frac{2\pi}{\lambda_0}h_2 \cos\theta}\right)^*\right) \left. \right\}^{-1/2}, \end{aligned} \quad (10)$$

解该超越方程, 即可求出极角 θ , 将 θ 代入 (9), (3) 式, 并用 (7) 式解得方位角 φ . 这是右手极化波的求解过程; 左手极化波与此类似, 不再赘述.

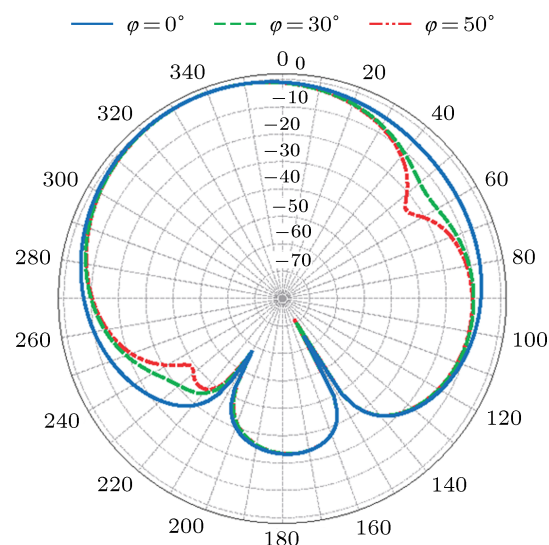


图 2 入射波极角为 30° , 反射波极角为 150° 时两个三阵子天线阵列的远场方向图

设有两种不同的地球表面 ($\epsilon_{r1} = 3, \sigma_1 = 0.1$), ($\epsilon_{r2} = 20, \sigma_2 = 5$), 频率为 15 MHz 的电磁波从 ($\theta = 30^\circ, \varphi = 120^\circ$) 方向入射, 用阵列抑制法求

得的波达角的 RMSE 如图 3 所示. 从图中可以看出, 尽管两种地面的构成参数相差很大, 但计算出的 DOA 的 RMSE 却几乎没有差别. 可见用此种方法可以保证求解波达角的精度而不用关心地面的构成.

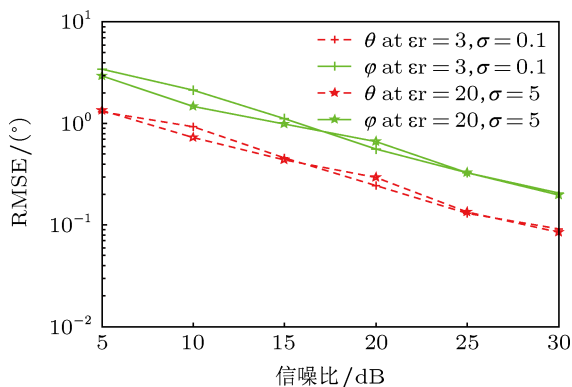


图 3 两种不同地面上方的两个三阵子天线阵列所求波达角的 RMSE 与信噪比的关系

4 求入射波的极化椭圆参数

在上一节中已经求出了入射波的 E_x, E_y, E_z 三个电场分量和波达角 (θ, φ) , 根据矢量在直角坐标系到球坐标系的变换公式

$$\begin{aligned} E_\theta &= E_x \cos \theta \cos \varphi + E_y \cos \theta \sin \varphi - E_z \sin \theta, \\ E_\varphi &= -E_x \sin \varphi + E_y \cos \varphi, \end{aligned} \quad (11)$$

可以计算出 E_θ 和 E_φ .

自由空间中传播的电磁波为 TEM 波, 在球坐

标系中, r 向分量 E_r 为零, Stokes 参数 (I, Q, U, V) 与 E_θ 和 E_φ 之间的关系为^[11,12]

$$\begin{aligned} I &= E_\theta E_\theta^* + E_\varphi E_\varphi^*, & Q &= E_\theta E_\theta^* - E_\varphi E_\varphi^*, \\ U &= E_\theta E_\varphi^* + E_\varphi E_\theta^*, & V &= j(E_\theta E_\theta^* - E_\varphi E_\varphi^*). \end{aligned} \quad (12)$$

虽然 Stokes 参数也可以描述电磁波的极化状态, 但最直观表示方法是电场矢端画出的轨迹图^[13](如图 4 所示), 其参数为轴比 $AR = \frac{b}{a}$ ($0 < AR < 1$), 椭圆倾角 β ($0 < \beta < \pi$) 及 α ($-\frac{\pi}{4} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{4}$, 为负表示左手极化, 为正表示右手极化). 当电磁波为完全极化波时, Stokes 参数与轨迹图参数 α, β 之间的关系表示为^[14]

$$\begin{aligned} Q &= I \cos 2\alpha \cos 2\beta, & U &= I \sin 2\alpha \cos 2\beta, \\ V &= I \sin 2\beta. \end{aligned} \quad (13)$$

由 (12), (13) 式有

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{U}{Q}, \\ \beta &= \begin{cases} \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{V}{\sqrt{Q^2 + U^2}}, & Q > 0, V > 0, \\ \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{V}{\sqrt{Q^2 + U^2}} + \frac{\pi}{2}, & Q > 0, V < 0, \\ \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{-V}{\sqrt{Q^2 + U^2}} + \frac{\pi}{2}, & Q < 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

椭圆极化轴比与 E_θ 和 E_φ 之间的关系为

$$AR = \frac{\sqrt{E_\theta E_\theta^* + E_\varphi E_\varphi^*} - \sqrt{(E_\theta E_\theta^* + E_\varphi E_\varphi^*)^2 + (E_\theta E_\varphi^* + E_\varphi E_\theta^*)^2}}{\sqrt{E_\theta E_\theta^* + E_\varphi E_\varphi^*} + \sqrt{(E_\theta E_\theta^* + E_\varphi E_\varphi^*)^2 + (E_\theta E_\varphi^* + E_\varphi E_\theta^*)^2}}. \quad (16)$$

至此, 极化椭圆参数求解完毕.

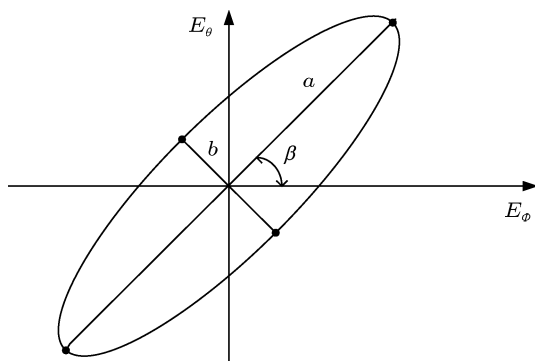


图 4 电场的椭圆极化参数表示示意图

5 结论

当三阵子天线位于地球表面时, 可以解决反方向共轭极化引起的 180° 模糊问题, 判断出电磁波的极化方向; 将本文给出的左手极化入射波的波达角求解公式与右手极化波的波达角求解公式相结合, 并利用本文提出的沿垂直于地面的 Z 轴放置的两个三阵子天线, 可以精确的求出波达角及电场强度的各个分量. 根据电场各分量与 Stokes 参数及椭圆极化参数间的关系, 即可求出入射电磁波的各种极化参数, 为电离层的研究提供参考数据.

- [1] Lundback J, Nordebo S 2003 *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium Columbus OH, USA*, 22–27 June, 2003 1 pp65–68
- [2] Lundback J, Nordebo S 2004 *IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop Proceedings Sitges Spain*, 18–21 July, 2004 pp284–288
- [3] Daldorff L K S, Turaga D S, Verscheure O, Biem 2009 *AIEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing Taipei* 19–24 April, 2009 p2149–2152
- [4] Chen L, Aminaei A, Falcke H, Gurvits L 2010 *Antennas & Propagation Conference Loughborough, UK* 8–9 November 2010 pp93–96
- [5] Karlsson R 2005 *Ph.D. Dissertation* (Uppsala: Uppsala University)
- [6] Bergmany J, Carozzi T D, Karlsson R <http://www.physics.irfu.se/Publications/Conferences/BergmanEtAl:HF04:2004.pdf> [17-Aug-2005 19: 57]
- [7] Rautio J C 1987 *IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter* 29 5
- [8] Kraus J D, Marhefka Ronald J (translated by Zhang W X) 2006 *Antennas: For all applications* (Third Edition) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp70–76 (in Chinese) [克劳斯 J D, 马赫夫克 R J 著 (章文勋译) 2006 天线第三版 (北京: 电子工业出版社) 第 70–76 页]
- [9] Balanis C A 2005 *Antenna Theory analysis and design third edition* (New Jersey: John Wiley& Sons) 284
- [10] Compton R T, JR 1981 *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 29 944
- [11] Liu T, Huang G M, Wang X S, Xiao S P 2009 *Acta Phys. Sin.* 58 3140 (in Chinese) [刘涛, 黄高明, 王雪松, 肖顺平 2009 物理学报 58 3140]
- [12] Shi J K, Lu W, Yan W, Ai W H 2013 *Acta Phys. Sin.* 62 078402 (in Chinese) [施健康, 陆文, 严卫, 艾卫华 2013 物理学报 62 078402]
- [13] Schreier P J 2008 *IEEE Transactions on Signal Processing* 56 4330
- [14] Collett E 2005 *Field Guide To Polarization* (Bellingham: SPIE Press) p7

Direction of arrival of EMW and polarization parameter estimation using tripole near the earth surface*

Sun Jie^{1)2)†} Zhang Xiao-Juan¹⁾ Fang Guang-You¹⁾

1) (Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 9 April 2013; revised manuscript received 24 June 2013)

Abstract

Based on the principal theory of tripole antenna in free space to compute the polar angle and azimuth angle of the incident electromagnetic wave (EMW), and the relations between each component of electric field and polarization, the formula for computing direction of arrival (DOA) of left-hand polarization electromagnetic wave and the method of determining the sense of the incident wave are presented. A novel method to filter out the reflected wave from the earth surface is put forward, which ensures the accuracy of the DOA, various polarization parameters are gained from DOA computed and electric field intensity, these polarization parameters serve as reference data for research of ionosphere and electromagnetic wave propagation in the ionosphere.

Keywords: earth surface, tripole antenna, DOA, polarization parameters

PACS: 84.40.—x, 84.40.Xb, 42.25.Ja

DOI: 10.7498/aps.62.198402

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No: 61172017).

† Corresponding author. E-mail: sunjief@163.com