0254-6124/2011/31(2)-208–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Zhao Hongmei, Jiang Changyin, Wang Jian. Analysis of properties for radiowave polarization plane rotation. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(2): 208-213

电波极化面旋转特性研究*

赵红梅[1] 江长荫[2] 王 健[1]

1(中国电波传播研究所 青岛 266107)

2(中国电波传播研究所 新乡 453003)

摘 要 推导了电波极化面旋转角表达式, 利用实测电子浓度、地磁场磁感应强度模与磁倾角剖面, 对定高载体、不同天线侧视方向与地球法线夹角、不同地区、不同频段、不同时段、不同太阳活动情况下的电波极化面旋转角进行了仿真, 并对仿真结果进行了分析, 得出了电波极化面旋转角的时域、地域、频域等规律和特性. 为这一领域的深入研究提供了参考.

关键词 电离层, 双折射, 电波极化面旋转

中图法分类号 P 353

Analysis of Properties for Radiowave Polarization Plane Rotation

ZHAO Hongmei[1] JIANG Changyin[2] WANG Jian[1]

1(*China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao* 266107)

2(*China Research Institute of Radiowave Propagation, Xinxiang* 453003)

Abstract The radiowave polarization plane rotation is caused by the ionospheric dispersion and the double refraction. Begin with the ionosphere refraction index, the formula of radiaowave polarization plane rotation angle is derived in this paper. Using the measured electron density, magnetic induction intensity module of geomagnetic field, and magnetic obliquity profiles, the radiaowave polarization plane rotation angle is simulated for fixed height carrier under different angles between antenna side-view and earth normal, different regions, different frequency bands, different time slots, and different solar activity cases, which is described by column diagraphs and tables. The simulation results and the rules and properties of radiowave polarization plane rotation angle are analyzed and summarized in its seasonal, temporal, regional, frequency-domain aspects. (1) The rotation angle will decrease as the frequency arises, and will increase as the angle between antenna side-view and earth normal arises. (2) The rotation angle will increase as the sun polar activity arises, larger in the day and smaller at night. (3) At night, the rotation angle in summer is the largest and in winter is the smallest as in high and middle latitude, larger in spring and autumn and smaller in summer and winter as in

* 国家科技重大专项基金项目资助 (2010ZX03006)

2009-02-26 收到原稿, 2010-11-15 收到修定稿

E-mail: zhm800723@sohu.com

low latitude. (4) In the day, the rotation angle in winter and spring is larger that in summer and autumn as in high latitude, larger in spring and autumn and smaller in summer and autumn.

Key words Ionosphere, Refractive index, Radiowave polarization plane rotation

1 引言

信号传播途经电离层时, 由于电离层是色散、双折射介质, 一个线极化波可以看成是由两个幅度相等, 并以相同角速度向相反方向旋转的圆极化波 (左旋极化波和右旋极化波) 的合成. 在忽略碰撞的前提下, 进行准纵向近似, 寻常波可认为是右旋圆极化波, 非常波可认为是左旋圆极化波. 但是, 由于寻常波与非常波的折射指数不同, 它们的传播相速度也不相同, 因此经过一段距离传播后合成的线极化波的电波极化面 (线极化与传播路径决定的平面) 会发生旋转, 又称法拉第旋转. 文献 [1–3] 从偏振或法拉第旋转角的测量方面讨论了地磁场对折射指数的影响. 文献 [4–7] 阐述了电离层双程传播的法拉第旋转对目标散射信号的幅度和相位的影响. 本文则是针对各种因素对电波在传播过程中产生的电波极化面旋转带来的不同影响变化进行深入分析.

2 电波极化面旋转角的推导

电离层的折射指数在不忽略地磁场时存在两个值, 即电波进入电离层后分裂为以不同速度传播的寻常波和非常波. 从地磁场和电子与其他粒子碰撞时的电离层折射指数 (Appleton-Hartree 公式, 简称 A-H 公式)[8] 出发, 同时考虑高频段可忽略电子与其他粒子的碰撞因素, 分析寻常波和非寻常波的电离层折射指数, 再基于传播三角关系, 可以得到电波极化面旋转角

$$\Omega = \frac{e^3}{8\pi^2 m^2 \varepsilon_0 c f^2}\int_{R_{\rm gi}} B\sin I N_{\rm e}{\rm d}R_{\rm g} \quad ({\rm rad}). \tag{1}$$

其中, e 为电子电荷 (C), m 为电子静止质量 (kg), ε_0 为真空介电常数 (F/m), c 为真空中光速 (m/s), f 为工作频率 (Hz), B 为地磁场的磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的模, I 为磁倾角 (°), $N_{\rm e}$ 为电离层电子浓度 ($\rm m^{-3}$), $R_{\rm gi}$ 为电波在电离层内的弯曲路径.

应用积分中值定理, 可以得到

$$\Omega = \frac{e^3}{8\pi^2 m^2 \varepsilon_0 c f^2}\cdot \overline{B\sin I}\int_{R_{\rm gi}} N_{\rm e}{\rm d}R_{\rm g} \quad ({\rm rad}). \tag{2}$$

计算结果表明, 在中国地区, 利用 400 km 处的 $B\sin I$ 代替式 (2) 中 $\overline{B\sin I}$ 的计算结果与式 (1) 的计算结果相差不超过 1%. 所以, 利用式 (2) 计算电波极化面旋转角是可行的.

利用 Snell 定律将式 (1) 展开可得到

$$\Omega = \frac{e^3}{8\pi^2 m^2 \varepsilon_0 c f^2}\overline{B\sin I}\cdot \int_{60}^{h_0} \frac{N_{\rm e} n(a+h)}{\sqrt{n^2(a+h)^2 - n_0^2(a+h_0^2)\cos^2\theta_0}}{\rm d}h \quad ({\rm rad}). \tag{3}$$

其中, n 为 P,L,X 波段高频近似得到的折射指数, 即

$$n \approx \sqrt{1-\frac{e^2 N_{\rm e}}{\varepsilon_0 m\omega^2}} = \sqrt{1-\frac{80.616\times 10^{-12}N_{\rm e}}{f^2}} \approx 1-\frac{40.308\times 10^{-12}N_{\rm e}}{f^2}. \tag{4}$$

3 数值仿真和分析

仿真数据选取, 载体海拔高度 $h_0 = 600$ km, 天线侧视方向与地球法线夹角 (a_0') 分别为 20° 和 55°, 工作频率 P 波段为 307.5 MHz、L 波段为 1410 MHz、X 波段为 10 300 MHz. 选取中国有代表性的高纬满洲里、中纬兰州、低纬海口三个地区, 太阳黑子数 12 个月平均流动值 (R_{12}) 取 160, 100, 10 三个典型值, 不同季节 3, 6, 9, 12 月 (对应春、夏、秋、冬四季), 典型时刻取当地时间 (LT) 02:00 和 14:00 (对应午夜和正午) 的大气层折射指数剖面和地磁场磁感应强度模与磁倾角沿高度的分布, 计算电波极化面旋转角, 结果如图 1∼6 和表 1∼3 所示.

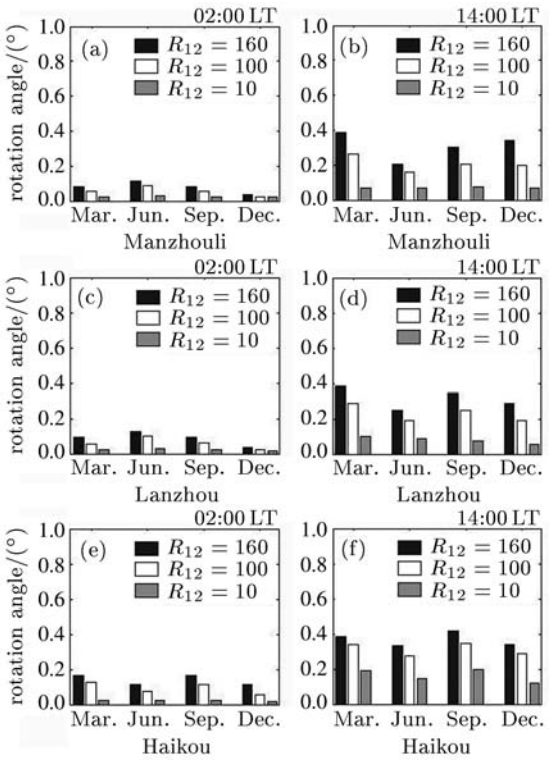


图 1 频率为 307.5 MHz、天线侧视方向与地球法线夹角为 20° 的电波极化面旋转角

Fig. 1 Radiowave polarization plane rotation angle for 307.5 MHz, and the angle between antenna side-view direction and earth normal is 20°

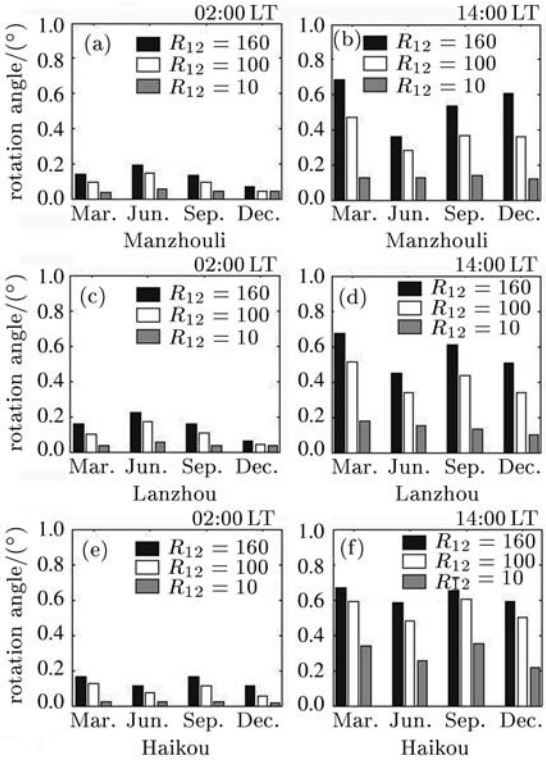


图 2 频率为 307.5 MHz、天线侧视方向与地球法线夹角为 55° 的电波极化面旋转角

Fig. 2 Radiowave polarization plane rotation angle for 307.5 MHz, and the angle between antenna side-view direction and earth normal is 55°

表 1 频率 307.5 MHz 电波极化面旋转角 $[10^{-2}(°)]$

Table 1 Radiowave polarization plane rotation angle for 307.5 MHz $[10^{-2}(°)]$

α_0'	R_{12}	地区	3 月		6 月		9 月		12 月	
			02:00 LT	14:00 LT	02:00 LT	14:00 LT	02:00 LT	14:00 LT	02:00 LT	14:00 LT
		满洲里	8.00	38.67	11.20	20.38	7.81	30.33	3.79	34.11
	160	兰州	9.08	38.12	12.80	25.03	9.07	34.45	3.45	28.48
		海口	16.22	38.23	11.22	33.55	16.73	41.54	11.26	33.99
		满洲里	5.29	26.20	8.52	15.69	5.37	20.55	2.60	20.04
20°	100	兰州	5.73	28.51	9.94	18.91	5.94	24.52	2.25	19.04
		海口	12.49	33.57	7.69	27.46	11.19	34.32	5.72	28.68
		满洲里	2.04	6.94	3.07	6.79	2.28	7.55	2.32	6.75
	10	兰州	2.03	9.86	3.00	8.39	2.05	7.37	1.86	5.36
		海口	2.23	19.18	2.08	14.31	2.07	19.89	1.69	11.96
		满洲里	13.83	68.58	19.40	36.33	13.50	53.77	6.55	60.52
	160	兰州	15.80	67.61	22.25	44.54	15.73	61.09	5.99	50.52
		海口	28.61	66.49	19.56	58.50	29.56	72.53	19.83	58.78
		满洲里	9.21	46.91	14.86	28.22	9.32	36.75	4.51	35.89
55°	100	兰州	10.02	51.00	17.36	33.86	10.36	43.84	3.92	34.09
		海口	22.12	58.97	13.45	48.26	19.83	60.51	10.07	50.26
		满洲里	3.58	12.64	5.40	12.40	3.99	13.73	4.07	12.26
	10	兰州	3.57	17.85	5.27	15.16	3.60	13.37	3.26	9.74
		海口	3.93	34.09	3.64	25.40	3.65	35.46	2.97	21.30

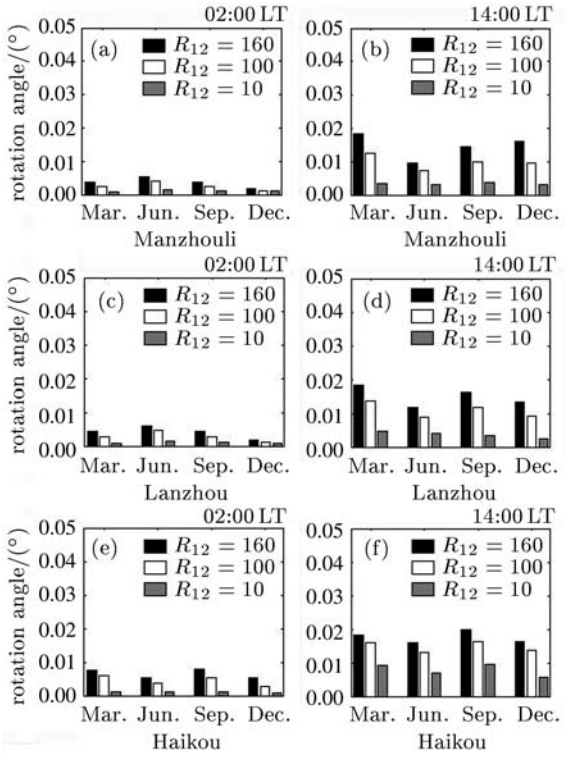


图 3 频率为 1410 MHz、天线侧视方向与地球法线夹角为 20° 的电波极化面旋转角

Fig. 3 Radiowave polarization plane rotation angle for 1410 MHz, and the angle between antenna side-view direction and earth normal is 20°

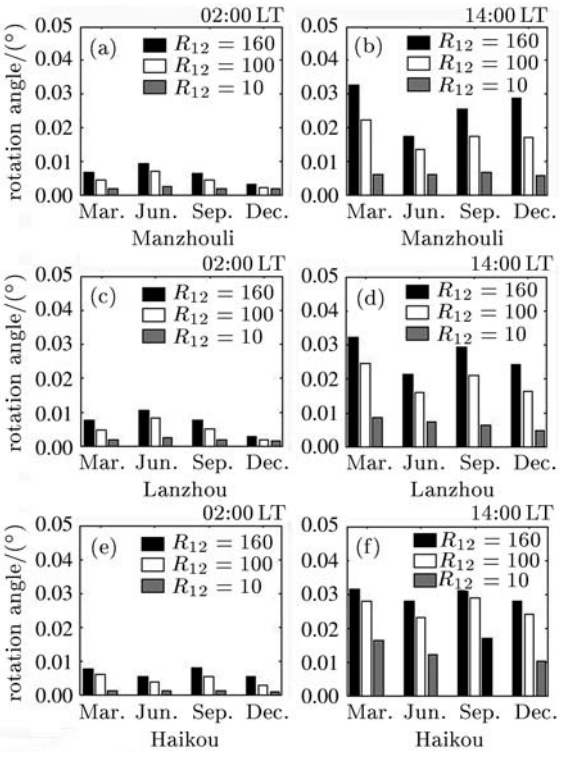


图 4 频率为 1410 MHz、天线侧视方向与地球法线夹角为 55° 的电波极化面旋转角

Fig. 4 Radiowave polarization plane rotation angle for 1410 MHz, and the angle between antenna side-view direction and earth normal is 55°

表 2 频率 1410 MHz 电波极化面旋转角 [10^{-3}(°)]

Table 2 Radiowave polarization plane rotation angle for 1410 MHz [10^{-3}(°)]

α_0'	R_{12}	地区	3 月		6 月		9 月		12 月	
			02:00 LT	14:00 LT	02:00 LT	14:00 LT	02:00 LT	14:00 LT	02:00 LT	14:00 LT
20°	160	满洲里	3.80	18.39	5.33	9.69	3.72	14.42	1.80	16.22
		兰州	4.32	18.13	6.09	11.90	4.31	16.38	1.64	13.55
		海口	7.72	18.18	5.34	15.96	7.95	19.76	5.36	16.17
	100	满洲里	2.52	12.46	4.05	7.46	2.55	9.77	1.23	9.53
		兰州	2.73	13.56	4.73	8.99	2.83	11.66	1.07	9.06
		海口	5.94	15.96	3.66	13.06	5.32	16.32	2.72	13.64
	10	满洲里	0.97	3.30	1.46	3.23	1.08	3.59	1.10	3.21
		兰州	0.97	4.69	1.43	3.99	0.97	3.51	0.88	2.55
		海口	1.06	9.12	0.99	6.81	0.98	9.46	0.80	5.69
55°	160	满洲里	6.57	32.59	9.22	17.27	6.42	25.56	3.11	28.76
		兰州	7.51	32.13	10.58	21.18	7.48	29.04	2.85	24.01
		海口	13.60	31.59	9.30	27.80	14.05	34.45	9.43	27.92
	100	满洲里	4.38	22.30	7.07	13.42	4.43	17.47	2.15	17.06
		兰州	4.76	24.24	8.25	16.10	4.93	20.84	1.87	16.21
		海口	10.51	28.02	6.40	22.93	9.43	28.75	4.79	23.88
	10	满洲里	1.70	6.01	2.57	5.90	1.90	6.53	1.94	5.83
		兰州	1.70	8.49	2.51	7.21	1.71	6.36	1.55	4.63
		海口	1.87	1.62	1.73	12.08	1.74	16.86	1.41	10.13

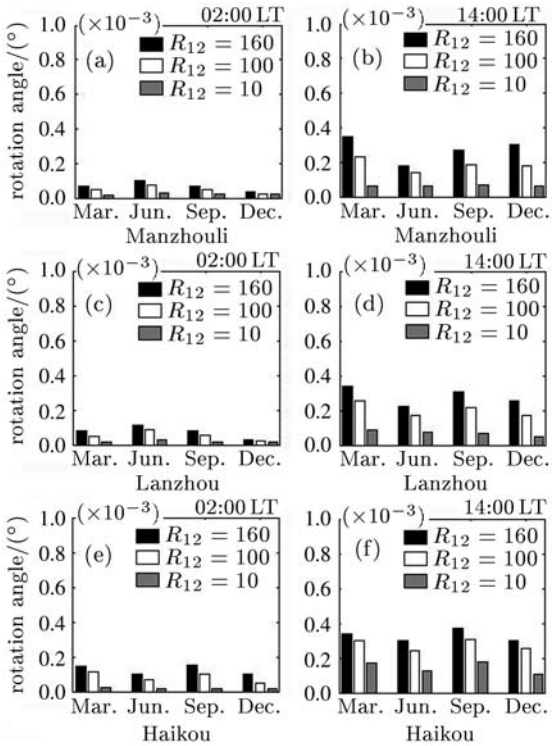


图 5 频率为 10300 MHz、天线侧视方向与地球法线夹角为 20° 的电波极化面旋转角

Fig. 5 Radiowave polarization plane rotation angle for 10300 MHz, and the angle between antenna side-view direction and earth normal is 20°

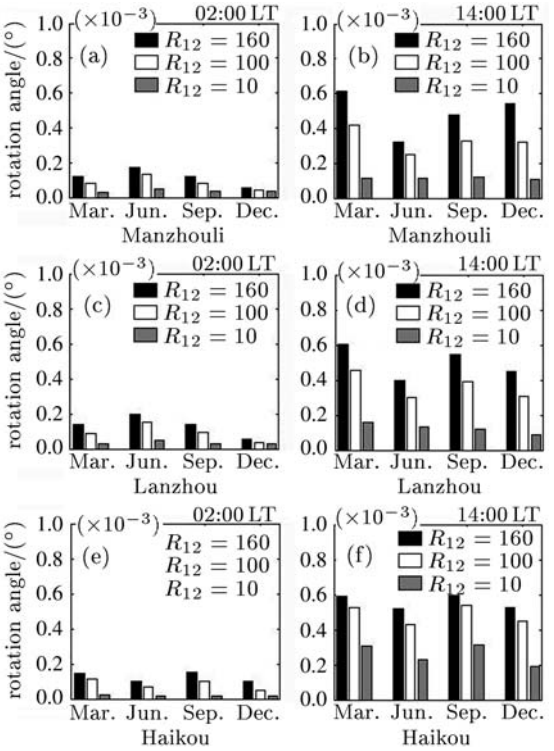


图 6 频率为 10300 MHz、天线侧视方向与地球法线夹角为 55° 的电波极化面旋转角

Fig. 6 Radiowave polarization plane rotation angle for 10300 MHz, and the angle between antenna side-view direction and earth normal is 55°

表 3 频率 10 300 MHz 电波极化面旋转角 [10^{-5}(°)]

Table 3 Radiowave polarization plane rotation angle for 10 300 MHz [10^{-5}(°)]

α_0'	R_{12}	地区	3 月		6 月		9 月		12 月	
			02:00 LT	14:00 LT	02:00 LT	14:00 LT	02:00 LT	14:00 LT	02:00 LT	14:00 LT
		满洲里	7.13	34.46	9.98	18.16	6.96	27.03	3.38	30.40
	160	兰州	8.09	33.98	11.41	22.31	8.08	30.70	3.07	25.39
		海口	14.46	34.07	10.00	29.90	14.91	37.02	10.04	30.30
		满洲里	4.72	23.35	7.60	13.99	4.78	18.32	2.31	17.86
20°	100	兰州	5.11	25.41	8.86	16.85	5.29	21.85	2.01	16.97
		海口	11.13	29.92	6.85	24.47	9.97	30.59	5.10	25.56
		满洲里	1.81	6.18	2.73	6.05	2.03	6.73	2.06	6.02
	10	兰州	1.81	8.78	2.68	7.48	1.82	6.57	1.65	4.78
		海口	1.98	17.09	1.85	12.76	1.84	17.72	1.50	10.66
		满洲里	12.32	61.08	17.28	32.37	12.03	47.90	5.83	53.90
	160	兰州	14.08	60.21	19.82	39.68	14.02	54.41	5.33	44.99
		海口	25.48	59.19	17.42	52.09	26.32	64.56	17.66	52.31
		满洲里	8.21	41.79	13.24	25.15	8.30	32.74	4.02	31.97
55°	100	兰州	8.93	45.42	15.47	30.16	9.23	39.05	3.50	30.37
		海口	19.70	52.50	11.99	42.98	17.67	53.87	8.97	44.74
		满洲里	3.19	11.27	4.82	11.05	3.55	12.23	3.63	10.93
	10	兰州	3.18	15.90	4.70	13.51	3.20	11.91	2.90	8.68
		海口	3.50	30.36	3.25	22.63	3.26	31.59	2.65	18.98

分析图 1~6 和表 1~3, 可以得出如下结论.

(1) 大气层对电波极化面的影响在 P 波段为 10^{-1} 度量级, 在 L 波段为 10^{-2} 度量级, 在 X 波段为 10^{-4} 度量级.

(2) 电波极化面旋转角随频率的增大而减小, 其原因在于, 频率增大, 则电离层的折射指数趋近于 1, 即接近于真空, 寻常波和非常波传播相速度均趋近于 1, 差别变小, 最终导致电波极化面旋转角减小.

(3) 电波极化面旋转角随天线侧视方向与地球法线夹角的增大而增大, 其原因在于, 角度越大, 传播路径越长, 则旋转角度越大.

(4) 电波极化面旋转角随太阳活动的增强而增大, 其原因在于电子浓度增大导致旋转角增大.

(5) 电波极化面旋转角白天高于夜间, 其原因在于白天电子浓度增大导致旋转角增大.

(6) 电波极化面旋转角存在明显地域性季节性变化规律. ①夜间中高纬度夏季最大, 冬季最小, 春秋两季居中, 且春秋两季相当; ②夜间低纬度春秋两季大于夏冬两季, 且夏冬两季相当; ③白天高纬度冬春两季大于夏秋两季, 且春季最高; ④白天中低纬度春秋两季大于夏冬两季, 且夏冬两季相当, 中纬春季最高, 低纬秋季最高. 此地域性季节性变化规律同样是由电子浓度的变化所致.

4 结论

利用公式推导详细介绍了产生电波极化面旋转角的原理, 并利用电子浓度、地磁场磁感应强度模与磁倾角剖面进行了仿真计算, 针对仿真结果分析了电波极化面旋转角的特性, 为这一领域深入研究提供了参考.

致谢 权坤海高级工程师提供了电子浓度、地磁场磁感应强度模与磁倾角剖面数据.

参考文献

[1] Wang Weimin, Zhu Honggan. Ionosphere faraday effect's influence on satellite communication [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 1997, **12**(4):453-457. In Chinese (王卫民, 朱宏淦. 电离层 Faraday 效应对卫星通信的影响 [J]. 电波科学学报, 1997, **12**(4):453-457)

[2] Rignot E. Effect of Faraday rotation on L-band interferometric and polarimetric synthetic aperture radar data [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2000, **38**(1):383-390

[3] Wright P, Quegan S, *et al.* Faraday rotation effects on L-band spaceborne SAR data [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2003, **41**(12):735-744

[4] Liu Jun, Kuga Y, Ishimaru A. Ionospheric effects on SAR imaging: A numerical study [J]. *Radio Sci.*, 2001, **41**(5):939-947

[5] Ishimaru A, Kuga Y, Liu J. Ionospheric effects on synthetic aperture radar at 100 MHz to 2 GHz [J]. *Radio Sci.*, 1999, **34**(1):257-268

[6] Freeman A, Saatchi S S. On the detection of faraday rotation in linearly polarized L-band SAR back scatter signatures [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2004, **42**(8):1607-1616

[7] Han Wenjun. Theoretical analysis of faraday rotation for trans-ionosphere two-way propagation [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2007, **22**(1):1-4. In Chinese (韩文焌. 穿越电离层双程传播–法拉第旋转的理论分析 [J]. 电波科学学报, 2007, **22**(1):1-4)

[8] Davies K. Ionospheric Radio [M]. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 70-73