DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2013.01.019

基于深空通信的 FQPSK 调制性能分析与仿真

刘 强[1]，梅进杰[2]，程 伟[2]，姚云龙[1]

（1. 空军预警学院研究生管理大队，湖北武汉 430019；2. 空军预警学院四系，湖北武汉 430019）

摘 要：FQPSK 调制已经被证实在 AWGN 信道中有很好的以牺牲较小的功率效率换取高带宽效率的性能。但深空信道却比 AWGN 信道复杂很多，天体公转运动时刻改变着通信受太阳闪烁影响的程度，从而使得深空信道特性随之成规律性变化。在研究这种变化的规律性的基础上，提出了可变 Rician 信道模型模拟深空信道，并对这种信道模型下 FQPSK 调制的性能进行仿真分析，以研究 FQPSK 在深空通信中的调制性能。仿真结果表明：在复杂的深空通信环境中，FQPSK 不仅能保持高带宽效率，而且仍然具有较好的误码性能，有很好的应用前景。

关键词：FQPSK 调制；深空通信；信道模型；太阳闪烁

中图分类号：TN927　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-2337(2013)01-0101-05

Analysis and Simulation on FQPSK Modulation Performance Applied to Deep Space Communication

LIU Qiang[1], MEI Jin-jie[2], CHENG Wei[2], YAO Yun-long[1]

(1. *Department of Graduate Management, Air Force Early Warning Academy, Wuhan* 430019, *China*;
2. *No.4 Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan* 430019, *China*)

Abstract: FQPSK modulation has been proved to own a good performance in acquiring high broadband efficiency at a cost of low power efficiency in the AWGN channel. However, the deep space communication channel is much more complex than the AWGN channel. The celestial body's revolution changes the degree of influence of sun blinking on communication all the time, causing the deep space channel specificity to change regularly. Based on studying the law of this change, this paper provides a variable Rician channel model to simulate the deep space channel, and analyzes the performance of FQPSK modulation in this Rician channel to study FQPSK's modulation performance in deep space communication. The result shows that FQPSK modulation not only keeps high broadband efficiency, but also has good power efficiency in complicated environment of deep space communication.

Key words: FQPSK modulation; deep space communication; channel model; sun blinking

1 引 言

由于深空探测的通信距离十分遥远，对调制方式的功率效率提出了很高的要求。但随着航天探测任务的不断增加，调制体制的高带宽效率越来越被重视起来。准恒包络调制逐渐被推向通信前沿，特别是以牺牲少量功率效率以换取高带宽效率的调制方式，FQPSK 就是其中的杰出者[1-2]。

1983 年，Feher 和 Kato 通过引入交叉相关来改良 IJF-QPSK 中的包络起伏，提出了 FQPSK（即 FQPSK-KF）调制。近年来，随着对这种调制方法更深刻的理解，增强型 FQPSK 不断出现，其中以 Simon 和 Yan 于 2000 年提出的 EFQPSK 最为经典[3]。作为由 FQPSK 及其增强型提供的比 QPSK 高得多的带宽效率的一种交换，在 AWGN 信道中已经被证明，当采用最佳接收时，渐进损失只有约 1 dB，并且当信噪比更小时，FQPSK 与 QPSK 之间的功率效率甚至更低[4]。

但天体运动时刻改变着太阳、地球、空间飞行器的位置，深空信道特性也在不断变化着，本文在研究信道特性变化的规律基础上，提出了可变参

收稿日期：2012-05-14；修回日期：2012-07-16

数 Rician 信道模型模拟深空信道，并对 FQPSK 调制在这种变化着的信道中的性能进行分析。

2 FQPSK 调制

传统的 FQPSK 是在 IJF-OQPSK 中引入交叉互相关运算，其调制原理如图 1 所示。

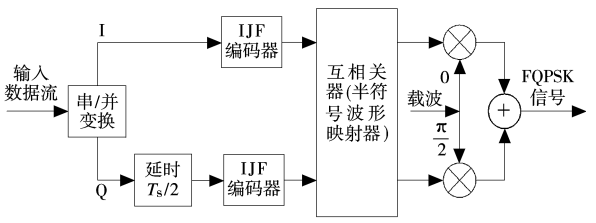


图 1 FQPSK 调制原理

为方便分析传统波形斜率的不连续性，引入逐符号重构法来分析 FQPSK 的交叉相关器。将 FQPSK 的半符号间隔进行互相关操作，变形为在符号间隔内直接对 I 和 Q 输入数据序列进行一次映射，并定义了时间间隔内的 16 种波形，它们共同组成 I 和 Q 两路发送信号集。具体 16 种波形如下所示。

$$
\begin{aligned}
&s_0(t)=1-k,\frac{-T_s}{2}\leqslant t\leqslant\frac{T_s}{2},\ s_8(t)=-s_0(t)\\
&s_1(t)=\begin{cases}1-k, & \frac{-T_s}{2}\leqslant t\leqslant 0,\\ 1-k\cos^2(\frac{\pi t}{T_s}), & 0\leqslant t\leqslant\frac{T_s}{2},\end{cases} \quad s_9(t)=-s_1(t)\\
&s_2(t)=\begin{cases}1-k\cos^2(\frac{\pi t}{T_s}), & \frac{-T_s}{2}\leqslant t\leqslant 0,\\ 1-k, & 0\leqslant t\leqslant\frac{T_s}{2},\end{cases} \quad s_{10}(t)=-s_2(t)\\
&s_3(t)=1-k\cos^2(\frac{\pi t}{T_s}),\frac{-T_s}{2}\leqslant t\leqslant\frac{T_s}{2},\ s_{11}(t)=-s_3(t)\\
&s_4(t)=(1-k)\sin(\frac{\pi t}{T_s}),\frac{-T_s}{2}\leqslant t\leqslant\frac{T_s}{2},\ s_{12}(t)=-s_4(t)\\
&s_5(t)=\begin{cases}(1-k)\sin(\frac{\pi t}{T_s}), & \frac{-T_s}{2}\leqslant t\leqslant 0,\\ \sin(\frac{\pi t}{T_s}), & 0\leqslant t\leqslant\frac{T_s}{2},\end{cases} \quad s_{13}(t)=-s_5(t)\\
&s_6(t)=\begin{cases}\sin(\frac{\pi t}{T_s}), & \frac{-T_s}{2}\leqslant t\leqslant 0,\\ (1-k)\sin(\frac{\pi t}{T_s}), & 0\leqslant t\leqslant\frac{T_s}{2},\end{cases} \quad s_{14}(t)=-s_6(t)\\
&s_7(t)=\sin(\frac{\pi t}{T_s}),\ \frac{-T_s}{2}\leqslant t\leqslant\frac{T_s}{2},\ s_{15}(t)=-s_7(t)
\end{aligned}
\tag{1}
$$

式中，$k=1-A$ 为 Feher 和 Kato 所允许的一个可控的包络波动因子，而对于准恒包络，$A=1/\sqrt{2}$。对以上定义波形分析，这 16 种波形在端点处斜率为 0，与任意两种波形的级联都不会出现斜率不连续的问题。但 $s_5(t)$、$s_6(t)$ 及其相应的 $s_{13}(t)$、$s_{14}(t)$ 在其中点处（即 $t=0$ 时）的斜率却是不连续的，这就对 FQPSK 的频谱滚降速度带来了影响。在文献[3]中，将 $s_5(t)$、$s_6(t)$ 重新定义，又考虑到信号对称性和硬件的实施也将 $s_4(t)$ 重新改写，$s_{13}(t)$、$s_{14}(t)$、$s_{12}(t)$ 也随之变化，具体表述为

$$
\begin{aligned}
&s_4(t)=\begin{cases}\sin(\frac{\pi t}{T_s})+k\sin^2(\frac{\pi t}{T_s}), & -\frac{T_s}{2}\leqslant t\leqslant 0,\\ \sin(\frac{\pi t}{T_s})-k\sin^2(\frac{\pi t}{T_s}), & 0\leqslant t\leqslant\frac{T_s}{2},\end{cases} \quad s_{12}(t)=-s_4(t)\\
&s_5(t)=\begin{cases}\sin(\frac{\pi t}{T_s})+k\sin^2(\frac{\pi t}{T_s}), & -\frac{\pi t}{T_s}\leqslant t\leqslant 0,\\ \sin(\frac{\pi t}{T_s}), & 0\leqslant t\leqslant\frac{\pi t}{T_s},\end{cases} \quad s_{13}(t)=-s_5(t)\\
&s_6(t)=\begin{cases}\sin(\frac{\pi t}{T_s}), & -\frac{\pi t}{T_s}\leqslant t\leqslant 0,\\ \sin(\frac{\pi t}{T_s})-k\sin^2(\frac{\pi t}{T_s}), & 0\leqslant t\leqslant\frac{\pi t}{T_s}\end{cases} \quad s_{14}(t)=-s_6(t)
\end{aligned}
\tag{2}
$$

这样就得到了 EFQPSK。EFQPSK 逐渐代替 FQPSK 的位置，并被作为通用的 FQPSK 来使用，文中也是以 EFQPSK 为研究对象。

3 信道特性分析

3.1 信道特性

深空信道除了信号信噪比极低外，还有两个显著的特性，即非线性和信道特性多变性。

与卫星通信一样，深空通信也面临着功率放大器所带来的非线性。非线性器件的影响下，输入信号的幅度变化不仅会引起输出信号的幅度畸变（AM-AM），也会导致输出信号相位的畸变（AM-PM），这样就严重影响了信号的传输性能[5]。在后面的研究内容中，将用 Saleh 模型来描述功率放大器的 AM-AM 和 AM-PM 特征，其具体表达式为

$$F_{\mathrm{AM/AM}}(\mu)=\frac{\alpha\mu(t)}{1+\beta\mu^2(t)} \tag{3}$$

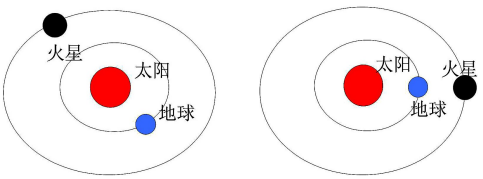
$$F_{\mathrm{AM/PM}}(\mu)=\frac{\varepsilon\mu^2(t)}{1+\eta\mu^2(t)} \tag{4}$$

式中，$\mu(t)$ 为输入信号幅度；$\alpha,\beta,\varepsilon,\eta$ 为模型可控参数。

与卫星通信相比，深空信道是复杂多变的，深空信号在宇宙空间中的传输会很大程度受到太阳活动的影响。太阳强闪烁时期，无线信号基本无法进行通信；在弱闪烁时期，也会不断向宇宙空间抛出电离子，信号传输经电离子反射而发生多径效应，严重影响着通信质量。太阳强闪烁对通信

的影响本文将不作研究。下面以 MER 系统来研究太阳弱闪烁对深空通信的影响。

地球和火星围绕太阳公转会出现一种特殊的位置状态——行星聚合，它又含两种状态：行星上合和行星下合，如图 2 所示。



(a)　行星上合　　(b)　行星下合

图 2　行星聚合的空间位置状态

在行星上合期间，地球与火星间的通信链路达到最远，并且通信链路离太阳最近，受日冕或太阳风抛射的不规则的带电粒子影响最大。这样会很大程度地造成信号的幅度起伏和频谱扩展，甚至会造成链路中断。反之在行星下合期间，通信链路短，空间衰减小，太阳活动对信号传输的影响较小，通信质量最好。为记录通信两端与太阳所处的位置，深空通信通常用太阳-地球-空间探测器的夹角(SEP)来描述通信端状态位置，其示意图如图 3 所示。

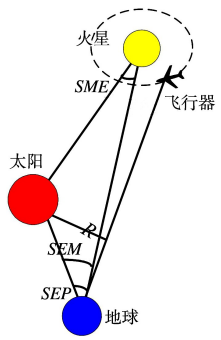


图 3　SEP 示意图

从图 3 中可以看出两通信天体围绕太阳的公转运动时刻改变着 SEP，也使得通信路径与太阳的垂直距离 R 不断变化，从而影响着信号受太阳闪烁影响的强度。在深空通信中，通常用闪烁指数(Scintillation Index)m 来反映太阳活动对信号传输引起的衰落程度。闪烁指数 m 定义为信号强度起伏的均方根值与强度的均值之比[6]。文献[7]经通过对大量工程测量数据研究和分析，得出受闪烁影响的信号包络是服从 Rician 分布的结论。其概率密度函数为

$$f(z)=\frac{2z}{\sigma^2}\mathrm{e}^{-K}\mathrm{e}^{-z^2/\sigma^2}I_0(2z\sqrt{K/\sigma^2}) \tag{5}$$

式中，K 为 Rician 因子；σ^2 为多径信号平均功率；$I_0(\cdot)$ 为第一类零阶修正贝塞尔函数。于是可以用 Rician 信道模型来描述深空信道。

星体的公转特性决定了 Rician 因子 K 的多变性，但它的变化规律是可以通过 m 来反映的，其关系可以描述如下：

$$K=\frac{\sqrt{1-m^2}}{1-\sqrt{1-m^2}},\ 0<m<1 \tag{6}$$

要找到星体公转(即 SEP)与信道特性变化(Rician因子)的特殊关系，是可以通过闪烁指数作为桥梁来建立联系的。表 1 为 Cassini 号探测器于 2000 年在 X 波段和 Ka 波段关于 m 与 SEP 的部分关系数据[7]。

表 1　m 与 SEP 的对应关系

日期	SEP/(°)	X 波段 m 值	Ka 波段 m 值
2000/133	0.64	0.800±0.072	0.846±0.100
2000/134	0.65	0.864±0.043	0.788±0.030
2000/135	1.10	0.920±0.078	0.285±0.032
2000/136	1.80	0.451±0.046	0.073±0.019
2000/137	2.40	0.280±0.009	0.137±0.040
2000/138	3.10	0.177±0.020	0.044±0.008
2000/139	23.8	0.032±0.007	0.008±0.004

表中日期 2000/133 表示 2000 年号探测第 133 天，表 1 仅为部分节选，更为详细的数据表见文献[8]。这样就为天体公转与信道特性的规律性变化找到了联系。

3.2　信道模型建立

根据以上特性分析，考虑路径损耗、多普勒频移，可以用以下可变参数 Rician 信道模型来模拟深空信道：

$$r(t)=\mathrm{Re}\Big\{M(SEP(t))d_s\sum_{n=0}^{N(t)}L_n(t)\cdot X[t-\tau_n(t)]\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi[f_c+f_{Dn}(t)][t-\tau_n(t)]}\Big\} \tag{7}$$

式中，$M(SEP(t))$ 为服从 Rician 分布的随机过程，其 Rician 因子受 $SEP(t)$ 影响；d_s 为非线性映射函数；$L_n(t)$ 为路径损耗；$f_{Dn}(t)$ 为多普勒频移；n 为多径数目。

对于 Rician 概率函数，当 K 足够大时是可近似为高斯分布；当 K 很小时，可退化为 Rayleigh 分布。这也是与实际深空信道中星体通信的空间位置状态相对应的。当 SEP 较大时，通信路径与太阳距离较大，受太阳影响较小，此时 K 因子能达

到足够大，在不考虑非线性影响时，深空信道可作 AWGN 来处理；反之，*SEP* 小到一定程度时，直射路径将不再存在，信道演变为 Rayleigh 信道。

4 EFQPSK 的解调

改良成逐符号映射的一个更深远的意义是能为 FQPSK 或其改进增强型设计一种新的接收机。这种接收机能引入调制过程中的相关性来显著提高误码性能。Viterbi 解调[3]和 MAP 解调[9]就是这方面的典型应用。图 4 为 MAP 接收机模型，与 Viterbi 接收机相比，该接收机不仅在复杂度上有所简化，而且在解调性能上有所增强。本文在 EFQPSK 解调中采用 MAP 解调技术。

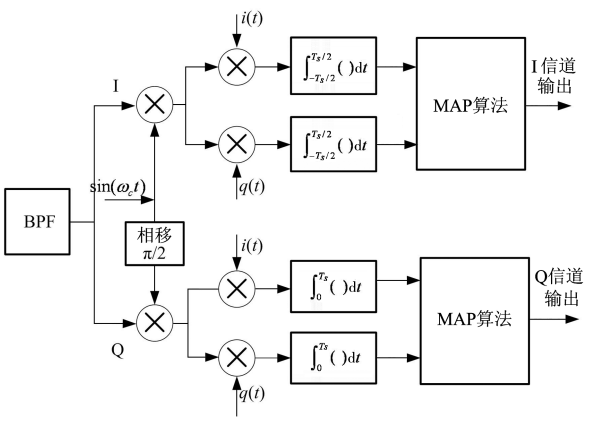


图 4 MAP 接收机

图中 BPF 为与接收端相匹配的滤波器，$i(t)$ 为 I 路基带信号，$q(t)$ 为 Q 路基带信号。

5 仿真分析

根据上面深空信道特性分析，利用 Matlab 仿真工具，对 EFQPSK 的调制性能进行仿真分析。

仿真 1：假设系统工作于 Ka 波段，码速率为 256 kbit/s，多普勒频移为 20 kHz。利用图 5 所示的仿真模型观察 *SEP* 的变化对 EFQPSK 在深空通信中的应用性能的影响。具体仿真为：分别计算 *SEP* 为 23.8°，2.4°，1.1°，0.65°时，在信噪比(SNR)为 1～10 dB 时的系统误比特率(BER)。其结果如图 6(a)所示。

仿真 2：研究不同波段与 EFQPSK 调制性能之间的关系。在图 5 模型中，假设码速率为 256 kbit/s，多普勒频移为 20 kHz，在调制信号分别

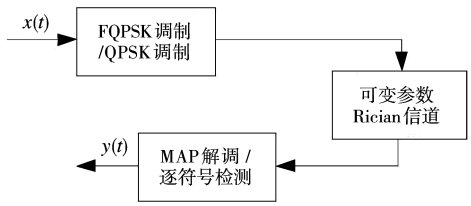


图 5 仿真模型

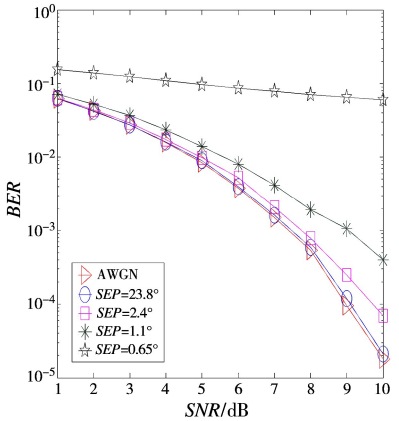
处于 X 波段和 Ka 波段的条件下，计算 $SNR=1\sim10$ dB，*SEP* 为 2.4°时模型的 *BER*。仿真结果如图 6(b)所示。

仿真 3：在仿真 2 的环境下，取系统波段为 Ka 波段，改变码率，观察码率对 FQPSK 的调制性能的影响。其结果如图 6(c)所示。

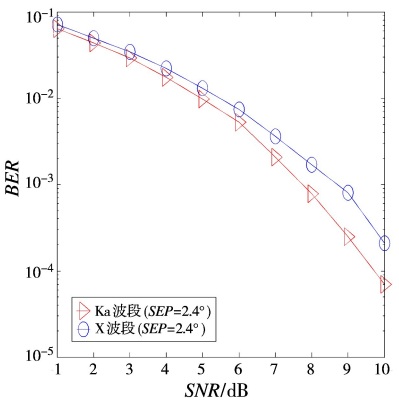
仿真 4：设定系统工作于 Ka 波段，码速率为 256 kbit/s，多普勒频移为 20 kHz，并在图 5 模型中引入非线性模块，观察 EFQPSK 在深空通信系统中的性能并与 QPSK 作比较。其中非线性模块采用 Saleh 模型，并取参数 $\alpha=2.1587$，$\beta=1.1517$，$\varepsilon=4.0033$，$\eta=9.1040$。具体仿真为：分别在 *SEP* 取 2.4°和 1.1°时，计算 EFQPSK 在 $SNR=1\sim10$ dB 时的系统误比特率并记录其频谱图，最后与同环境下的 QPSK 调制信号作比较。其仿真结果如图 7 所示。

图 6 反映了 *SEP* 变化，波段选择以及传输速率对系统误比特率的影响。图 6(a)是在不考虑非线性器件条件下，对 EFQPSK 在可变 Rician 信道模型中的误码性能分析。仿真结果显示：当 *SEP* 较大时，误码曲线与 AWGN 近似重合；在 *SEP* 从较大逐渐减小的过程中，信道环境越来越差，信道从 AWGN 模型经过 Rician 信道演变为 Rayleigh 信道，这与前面的描述相符。而图 6(b)和图 6(c)反映了通信系统中的一般规律：即同等条件下，高载频和低码率在衰落信道中有更高的可靠性，这为研究 EFQPSK 在深空通信中如何有效解决可靠性和有效性之间的平衡问题打下了一定的基础。

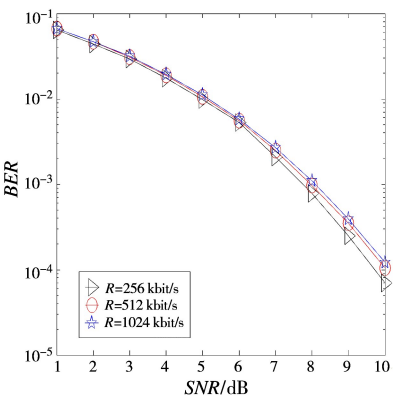
从图 7(a)可以看到 EFQPSK 在深空信道中传输所带来的频谱优势：EFQPSK 的频谱滚降速率要远远快于 QPSK，并且主瓣能量集中，这使得 EFQPSK 所占频带相对较窄，能有效利用频带资源并且有效减小了邻道干扰。图 7(b)是利用式(7)的模型对 EFQPSK 在深空系统中的传输效果的总体仿真。仿真结果表明：EFQPSK 在误码性能方面要略差于 QPSK 信号，在 AWGN 信道下误



(a)　SEP 对 EFQPSK 调制性能的影响



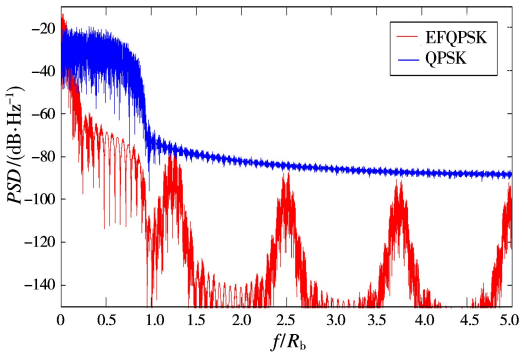
(b)　波段对 EFQPSK 调制性能的影响



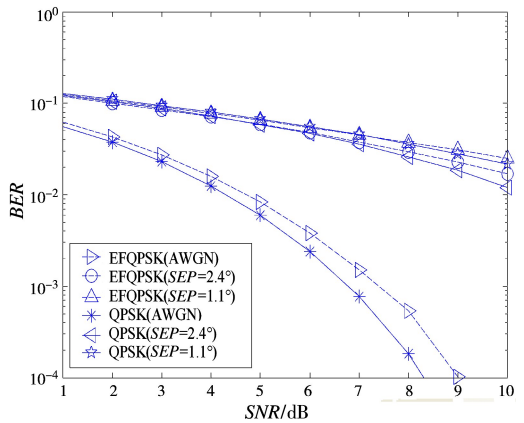
(c)　码率对 EFQPSK 调制性能的影响

图 6　各参数与 EFQPSK 调制性能的关系图

比特率达到 10^{-4} 时，EFQPSK 要比 QPSK 损失约 1 dB，这与文献[3]所描述的一致；而在 *SEP* 分别为 2.4° 和 1.1° 时，同一误比特率条件下，所需 *SNR* 值的差异也只是在 1.5 dB 左右浮动，并且当信噪比较小时，EFQPSK 与 QPSK 的性能差距甚至更小。所以相比 QPSK，EFQPSK 在深空通信中的应用时，不仅能有很好的带宽效率，还能有比较理想的误码性能。



(a)　EFQPSK 和 QPSK 的频谱比较



(b)　EFQPSK 在深空信道中的误码性能

图 7　EFQPSK 在深空通信中的调制性能

6　结束语

本文结合天体公转，考虑太阳闪烁对深空信道特性的影响，提出了能较为准确反映深空通信环境的可变参数 Rician 信道模型，并在该信道模型下对 EFQPSK 的调制性能进行了仿真分析，最后与同等环境下的 QPSK 调制进行了比较。通过比较，发现 EFQPSK 相对于 QPSK，在复杂的深空信道中仍能保持较好的误码性能，能够很好地应用于实际的深空通信中。

参考文献：

[1] Kato S, Feher K. XPSK: A New Cross-Correlated Phase-Shift-Keying Modulation Technique[J]. IEEE Trans on Communications, 1983, 31(5):701-707.

[2] Leung P, Feher K. FQPSK:a Superior Modulation Technique for Mobile and Personal Communications[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 1993, 39(2):288-294.

[3] Marvin K S. Bandwidth Efficient Digital Modulation with Application to Deep Space Communications[M]. California:JPL Publication, 2001.

(下转第 110 页)