

文章编号: 1672-2892(2012)02-0178-06

认知信号在多径信道中频谱成形的优化方法

李 滔, 徐家品

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘 要: 针对认知信号在多径衰落信道中发生畸变而导致通信质量急剧降低的问题, 本文根据信息论和通信原理知识, 提出了一种对认知信号采用频谱成形技术实现优化的新方法, 使认知信号的传输速率与通信质量得以提高。最后通过仿真实验与无频谱成形情况对比, 证实了该优化方法确实能够减小多径衰落信道对认知信号的影响, 提高了认知信号传输速率和质量。

关键词: 认知信号; 多径干扰; 频谱成形; 优化方法

中图分类号: TN924

文献标识码: A

Scheme of optimizing cognitive signal by using spectrum shaping in multipath fading communication channels

LI Tao, XU Jia-pin

(School of Electronics and Information, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China)

Abstract: Signals transmitting in the multipath channels are usually disturbed by multipath interference. Therefore, the signal received in the receiver deforms, and the communication quality in the channel slumps dramatically. In this paper, one kind of optimization method involving in spectrum shaping of cognitive signal is proposed by comparison with the signal without spectrum shaping, according to the related knowledge of information theory. It can be justified theoretically that the new approach improves the information transmission rate and communication quality significantly in the practical communication channels. Besides, the simulation result further confirms that the method of spectrum shaping plays an important role in improving the quality and transmission rate of cognitive signal in the multipath channel.

Key words: cognitive signal; multipath interference; spectrum shaping; optimization method

随着无线电技术的发展和应用, 有限的频谱资源越来越稀缺。1999 年, Joseph Mitola 提出了认知无线电技术, 它能够有效提高频谱利用率^[1-2], 因此近年来认知无线电在国际上广受关注, 成为各科研机构的研究热点。然而信号在传输过程中总会受到各种噪声的影响, 其中多径衰落干扰就会严重破坏通信质量^[3]。当然, 认知信号在传输过程中也不例外, 其通信质量在多径信道中传输会严重下降^[4-5]。本文在已有单对单接收机-发送机模型^[6]基础上, 针对多径衰落信道的特点, 利用频谱成形方法^[7-9], 提出一种认知信号优化方案, 以提高认知信号在信道中的通信质量。

1 单对单接收机-发送机模型

该模型包括 2 对发送机和接收机。第 1 对是合法发送机和合法接收机, 第 2 对是认知发送机和认知接收机。在多径衰落信道中, 暂不考虑传播时延。设合法用户发射信号用 $x(t)$ 表示, 认知用户发射信号用 $c(t)$ 表示。整个系统模型可以分为合法接收信号子模块和认知接收信号子模块, 下面具体说明 2 个子模块。

1.1 合法接收信号模块

假设合法用户发送信号为零均值周期对称复高斯随机信号, 用 X 表示, 其信息速率为 R_1 , 信号周期为 T , 发送功率为 σ_s^2 , 那么合法接收机接收信号由式(1)表示:

$$y_1(t) = a_{11}x(t) + a_{c1}c(t) + n_1(t) \quad (1)$$

式中： a_{11} 表示合法接收机接收到的合法信号衰减； a_{c1} 表示合法接收机接收到的认知信号衰减， $n_1(t)$ 为白噪声，其功率谱密度为 σ_1^2 。对 $y_1(t)$ 以周期 T 抽样，得到抽样后的信号为：

$$Y_1[k] = a_{11}X[k] + a_{c1}C[k] + N_1[k] \quad (2)$$

1.2 认知接收信号模块

认知信号为宽平稳信号，限定其最大平均功率为 P ，其统计特性功率谱由 $\phi_c(\omega)$ 表征。由于认知信号受到不能完全消除的多径干扰，认知接收机接收信号表示如下^[10]：

$$y_c(t) = a_{1c}x(t) + a_{cc}c(t) + \sum_k g_{ck}c(t - \tau_k) + n_c(t) \quad (3)$$

式中： a_{1c} 表示认知接收机接收到的合法信号衰减； a_{cc} 表示认知接收机接收到的认知信号衰减； $\sum_k g_{ck}c(t - \tau_k)$ 为经认知接收机处理后的多径干扰， g_{ck} 表示第 k 项干扰衰减， τ_k 表示受到的第 k 个多径干扰信号的时延； $n_c(t)$ 为白噪声，其功率谱为 σ_c^2 。对 $y_c(t)$ 以周期 T 抽样，得到抽样后的信号为：

$$Y_c[k] = a_{1c}X[k] + a_{cc}C[k] + \sum_n g_n C[k] + N_c[k] \quad (4)$$

式中 $\sum_n g_n C[k]$ 为发送认知信号，由于多径干扰存在，令 $\sum_n g_n^2 = g_c^2$ ，其中 g_c^2 为干扰噪声总功率。通常情况下 $a_{cc} \gg g_c$ 。

1.3 关于认知信号功率谱 $\phi_c(\omega)$ 的2个约束条件

首先，由于合法信号存在，认知信号的发送会受到限制，如果认知信号功率过大，会影响合法信号，这里设最大发送功率为 P ，得到第1个约束条件：

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \phi_c(\omega) d\omega \leq P \quad (5)$$

式中 $\phi_c(\omega)$ 为认知信号的功率谱。

其次，由于合法发送机发送信号的速率为 R_1 ，为了保证合法接收机能够有效接受合法信号，得到第2个约束条件：

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \log \left(1 + \frac{a_{11}^2 \sigma_s^2}{a_{c1}^2 \phi_c(\omega) + \sigma_1^2} \right) d\omega \geq R_1 \quad (6)$$

2 无频谱成形

首先分析无频谱成形的情况。设认知信号的功率谱 $\phi_c(\omega)$ 在 $[-\pi, \pi]$ 范围内为一个常数，令其值为 ϕ_0 。由式(5)~式(6)可以得到： $\phi_0 \leq P$ 且 $\phi_0 \leq \frac{1}{a_{c1}^2} \left(\frac{a_{11}^2 \sigma_s^2}{e^{R_1} - 1} - \sigma_1^2 \right)$ ，取 ϕ_0' 为 P 与 $\frac{1}{a_{c1}^2} \left(\frac{a_{11}^2 \sigma_s^2}{e^{R_1} - 1} - \sigma_1^2 \right)$ 中的较小值。

认知接收机收到的合法信号很弱，即使在没有发送认知信号情况下，亦不能译码出合法信号，即：

$$\log \left(1 + \frac{a_{1c}^2 \sigma_s^2}{\sigma_c^2} \right) \leq R_1 \quad (7)$$

因此认知信号接收机在译码认知信号时，将合法信号视为干扰噪声，得到认知信号的传送速率为：

$$R_c = \log \left(1 + \frac{a_{cc}^2 \phi_0}{a_{c1}^2 \sigma_s^2 + g_c^2 \phi_0 + \sigma_c^2} \right) \quad (8)$$

由于 $a_{c1}^2 \sigma_s^2$ 和 σ_c^2 均大于零，易知当 ϕ_0 取最大值时， R_c 取得最大值。因此认知信号的最大传输速率为：

$$R_{c,\max} = \log \left(1 + \frac{a_{cc}^2 \phi_0'}{a_{lc}^2 \sigma_s^2 + g_c^2 \phi_0' + \sigma_c^2} \right) \quad (9)$$

3 频谱成形

对比上面无频谱成形的情况,在相同条件下,根据信息论相关知识,可求出认知信号传输速率:

$$R_c = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \log \left(1 + \frac{a_{cc}^2 \phi_c(\omega)}{a_{lc}^2 \sigma_s^2 + g_c^2 \phi_c(\omega) + \sigma_c^2} \right) d\omega \quad (10)$$

下面对式(5)~式(6)作具体分析。

当 $P \leq \frac{1}{a_{lc}^2} \left(\frac{a_{ll} \sigma_s^2}{e^{R_1} - 1} - \sigma_1^2 \right)$ 时,式(6)不产生约束作用。令 $\phi_c(\omega) = P, \omega \in [-\pi, \pi]$,这与未优化情形相同,传输速率为:

$$R_c = \log \left(1 + \frac{a_{cc}^2 P}{a_{lc}^2 \sigma_s^2 + g_c^2 P + \sigma_c^2} \right) \quad (11)$$

当 $P > \frac{1}{a_{lc}^2} \left(\frac{a_{ll} \sigma_s^2}{e^{R_1} - 1} - \sigma_1^2 \right)$ 时,式(6)产生作用。此时频谱成形优化方案设计如下:

$$\phi_c(\omega) = \begin{cases} \alpha|\omega| & \omega \in [-\theta, \theta] \\ 0 & \omega \in [-\pi, -\theta] \cup [\theta, \pi] \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入不等式(5)并取等号,可知: $\alpha = \frac{2\pi P}{\theta^2}$,同时 θ 满足不等式(6),即 $\frac{1}{2\pi} \int_{-\theta}^{\theta} \log \left(1 + \frac{a_{ll}^2 \sigma_s^2}{a_{cl}^2 \frac{2\pi P}{\theta^2} |\omega| + \sigma_1^2} \right) d\omega \geq R_1$ 。

可以看到,系统参数 a_{ll}^2, a_{cl}^2, R_1 决定 θ 的取值范围。这里称 $\frac{\theta}{\pi}$ 为占频系数。

将式(12)带入式(10),可得优化传输速率。

$$R_{c,\text{opt}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\theta}^{\theta} \log \left(1 + \frac{a_{cc}^2 \alpha |\omega|}{a_{lc}^2 \sigma_s^2 + g_c^2 \alpha |\omega| + \sigma_c^2} \right) d\omega \approx \frac{\theta}{\pi} \log \left(\frac{a_{cc}^2 \alpha \theta + g_c^2 \alpha \theta + a_{lc}^2 \sigma_s^2 + \sigma_c^2}{g_c^2 \alpha \theta + a_{lc}^2 \sigma_s^2 + \sigma_c^2} \right) \quad (13)$$

4 仿真结果

上文从理论上分析了认知信号在无频谱成形和经过频谱成形后的最大传输速率。下面给出 Matlab 仿真对比结果图。

由于 $\frac{1}{a_{lc}^2} \left(\frac{a_{ll}^2 \sigma_s^2}{e^{R_1} - 1} - \sigma_1^2 \right)$ 和 $a_{cc}:g_c$ 取值均会影响仿真结果,因此仿真过程分为2种情况:

1) 由于 $a_{cc} \gg g_c$, 仿真中分别取 $a_{cc}:g_c=50:1, a_{cc}:g_c=100:1, a_{cc}:g_c=200:1$, 为方便起见, 设 $a_{cc}^2 : (a_{lc}^2 \sigma_s^2 + \sigma_c^2) = 1:1$, $\frac{1}{a_{lc}^2} \left(\frac{a_{ll}^2 \sigma_s^2}{e^{R_1} - 1} - \sigma_1^2 \right) = 10$, 占频系数分别取为 0.2, 0.4, 0.5, 0.8。在仿真图中, 虚线表示无频谱成形传输速率函数, 实线表示频谱成形传输速率函数, 横坐标表示信号传输功率, 纵坐标表示认知信号传输功率。仿真结果如下。

a) 取 $a_{cc}:g_c=50:1$, 根据前文分析, 可以得到认知信号在无频谱成形和频谱成形后最大传输速率的对比情形, 如图1所示。图1中, 当占频系数较小时, 例如 0.2 时, 无频谱成形传输速率较大。然而随着占频系数增加, 频谱成形优势越来越明显。当占频系数为 0.4 时, 频谱成形信号最大速率较未经成形信号最高速率提高了 30.51%; 当占频系数为 0.5 时, 成形信号最高速率较未经成形信号最大速率提高了 63.13%; 当占频系数为 0.8 时, 成形信号最高速率更是提高了 161.01%。

b) 取 $a_{cc}:g_c=100:1$, 根据前文分析, 可以得到认知信号在无频谱成形和频谱成形后最大传输速率的对比情形, 如图2所示。图2得到的结果与 $a_{cc}:g_c=50:1$ 的情形基本相同, 只是频谱成形的优势更加明显, 例如, 占频系数为

0.8 时，成形信号最大速率更较无成形速率提高了 205.77%。

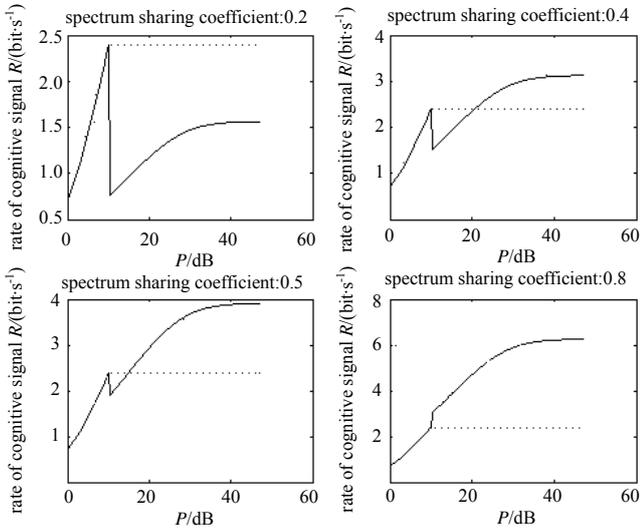


Fig.1 Comparison of rate between shaping signal and original signal when $a_{cc}:g_c=50:1$
图 1 $a_{cc}:g_c=50:1$ 时，成形信号与原始信号速率比较

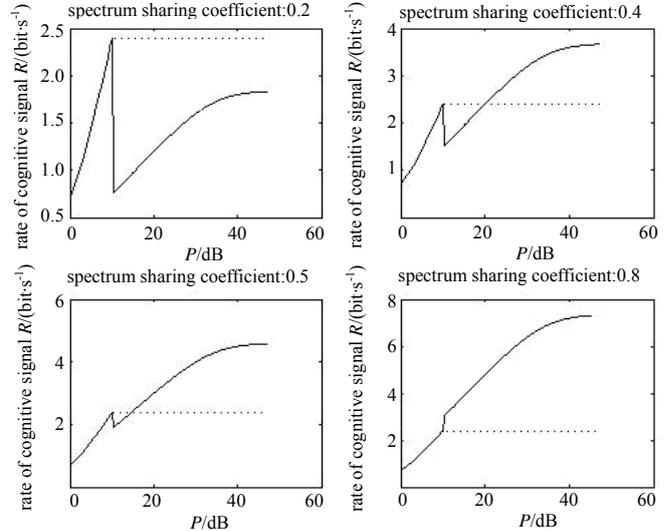


Fig.2 Comparison of rate between shaping signal and original signal when $a_{cc}:g_c=100:1$
图 2 $a_{cc}:g_c=100:1$ 时，成形信号与原始信号速率比较

c) 取 $a_{cc}:g_c=200:1$ ，根据前文分析，可以得到认知信号在无频谱成形和频谱成形后最大传输速率的对比情形，如图 3 所示。图 3 得到的结果也与 $a_{cc}:g_c=50:1$ 的情形基本相同，并在仿真结果中频谱成形优势最明显。例如，在占频系数为 0.5 时，成形信号最大速率提高了 117.17%，在占频系数为 0.8 时，成形速率更是提高了 247.48%。

从上面的仿真结果中可以看到，频谱成形技术可以显著提高认知信号速率，并随着占频系数增加，这种趋势越来越明显。

2) 由于 $\left(\frac{a_{ll}\sigma_s^2}{e^{R_l}-1}-\sigma_1^2\right)$ 的取值一般不会太大，故在仿真中依次取为 2,5,10，占频系数分别为 0.2,0.4,0.5,0.8。

为方便起见，设 $a_{cc}^2:(a_{lc}^2\sigma_s^2+\sigma_c^2)=1:1, a_{cc}:g_c=50:1$ ，仿真结果如下：

a) 取 $\left(\frac{a_{ll}\sigma_s^2}{e^{R_l}-1}-\sigma_1^2\right)=2$ ，根据前文分析，可以得到认知信号在无频谱成形和频谱成形后最大传输速率的对比

情形，如图 4 所示。图 4 中，当占频系数较小时，例如当其为 0.2 时，无频谱成形传输在一段功率范围内速率较大。然而随着占频系数增加，频谱成形优势越来越明显。当占频系数为 0.4 时，经过频谱成形的最大信号速率较未经成形信号最大速率提高了 180.71%；当占频系数为 0.8 时，成形信号最大速率更是提高了 461.43%。

b) 取 $\left(\frac{a_{ll}\sigma_s^2}{e^{R_l}-1}-\sigma_1^2\right)=5$ ，根据前文分析，可以得到认知信号在无频谱成形和频谱成形后最大传输速率的对比

情形，如图 5 所示。图 5 得到的结果与 $\left(\frac{a_{ll}\sigma_s^2}{e^{R_l}-1}-\sigma_1^2\right)=2$ 时的情形基本相同，只是频谱成形的优势减小，例如占

频系数为 0.2 时，无频谱成形传输速率较大；在占频系数为 0.4 时，成形信号最大速率提高了 72.20%；在占频系数为 0.8 时，成形信号最大速率提高了 244.40%。

c) 取 $\left(\frac{a_{ll}\sigma_s^2}{e^{R_l}-1}-\sigma_1^2\right)=10$ ，根据前文分析，可以得到认知信号在无频谱成形和频谱成形后最大传输速率的对比

情形，如图 6 所示。图 6 得到的结果与 $\left(\frac{a_{ll}\sigma_s^2}{e^{R_l}-1}-\sigma_1^2\right)=5$ 时的情形基本相同，但其在仿真结果中频谱成形优势最

弱。例如，在占频系数为 0.4 时，成形信号最大速率只提高了 28.74%。

从上面的仿真结果中可以看到，频谱成形技术可以有效提高认知信号速率，并随着占频系数增加，这种趋势越来越明显。

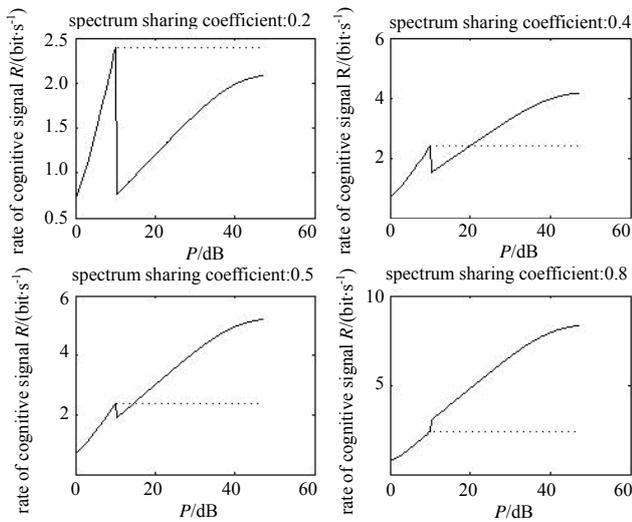


Fig.3 Comparison of rate between shaping signal and original signal when $a_{cc}:g_c=200:1$
图3 $a_{cc}:g_c=200:1$ 时, 成形信号与原始信号速率比较

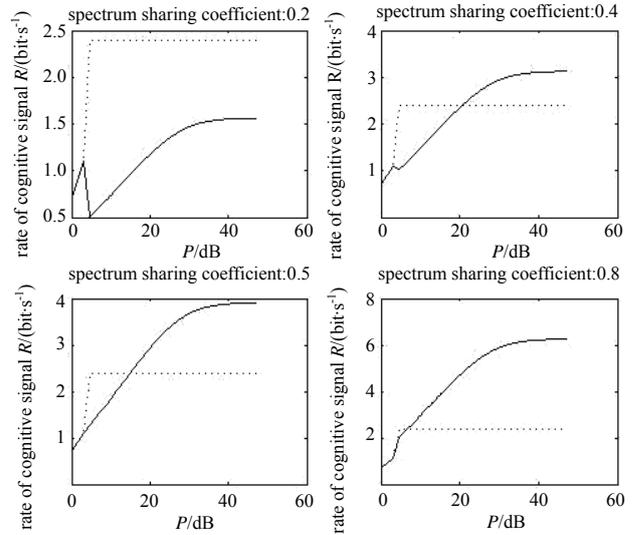


Fig.4 Comparison of rate between shaping signal and original signal

$$\text{when } \frac{a_{\parallel}\sigma_s^2}{e^{R_1}-1} - \sigma_1^2 = 2$$

图4 $\frac{a_{\parallel}\sigma_s^2}{e^{R_1}-1} - \sigma_1^2 = 2$ 时, 成形信号与原始信号速率比较

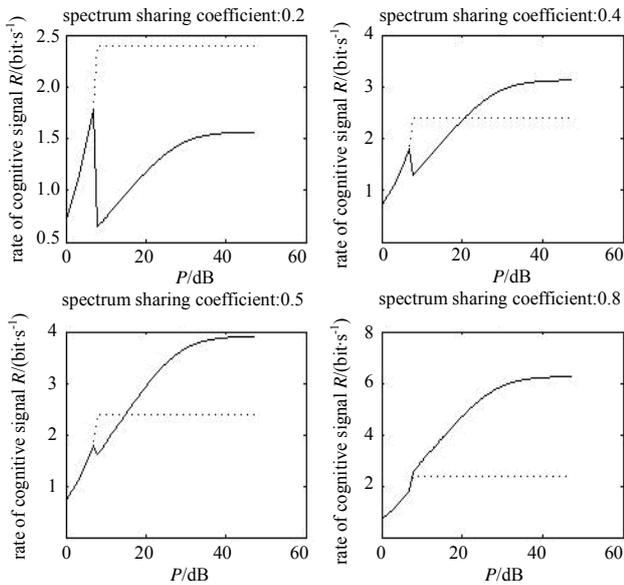


Fig.5 Comparison of rate between shaping signal and original signal

$$\text{when } \frac{a_{\parallel}\sigma_s^2}{e^{R_1}-1} - \sigma_1^2 = 5$$

图5 $\frac{a_{\parallel}\sigma_s^2}{e^{R_1}-1} - \sigma_1^2 = 5$ 时, 成形信号与原始信号速率比较

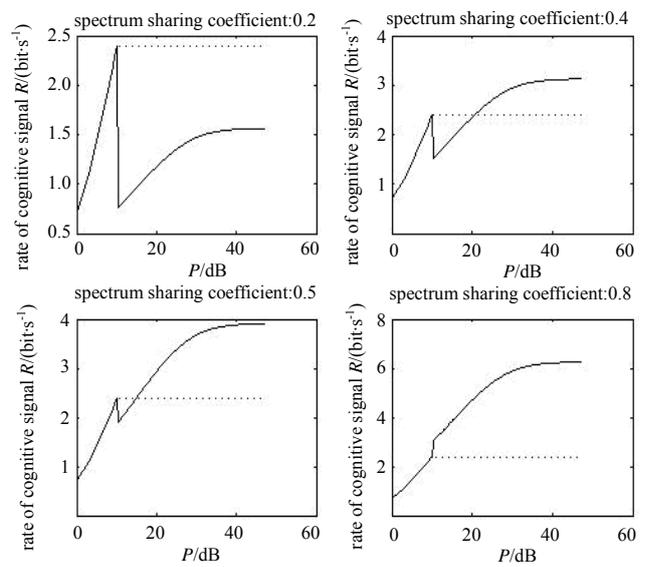


Fig.6 Comparison of rate between shaping signal and original signal

$$\text{when } \frac{a_{\parallel}\sigma_s^2}{e^{R_1}-1} - \sigma_1^2 = 10$$

图6 $\frac{a_{\parallel}\sigma_s^2}{e^{R_1}-1} - \sigma_1^2 = 10$ 时, 成形信号与原始信号速率比较

5 结论

本文研究考虑了多径干扰因素, 使模型更接近实际情况, 频谱成形可以从整体上提高认知信号速率。在占频系数较大时, 认知信号速率大幅度提高, 较无成形信号, 其速率大约增加3倍, 几乎达到预期的目标。但在占频系数非常小时, 频谱成形后的速率在较大功率范围内改善还不明显。

本文只讨论了认知信号接收机收到的合法信号很弱,无法译出合法信号的情形;当合法信号较强,可以译出合法信号的情况,则是后续的研究工作。

参考文献:

- [1] Mitola J. Cognitive radio:an integrated agent architecture for software defined radio[M]. Stockholm,Sweden:Doctor of technology,Royal Inst. Techno, 2000.
- [2] Goldsmith A,Jafar S A,Maric I,et al. Breaking spectrum gridlock with cognitive radios:an information theoretic perspective[J]. Proc. of the IEEE, 2009,97(5):894-914.
- [3] Tranter W H,Shanmugan K S,Rappaport T S,et al. Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications[M]. Beijing:China Machine Press, 2005.
- [4] Cadambe V R,Jafar S A. Interference alignment and the degrees of freedom for the K-user interference channel[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2008,54(8):3425-3441.
- [5] Devroye N,Mitran P,Tarokh V. Achievable rates in cognitive radio Channels[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2006,52(5): 1813-1827.
- [6] Zhang Wenyi,Mitra U. Spectrum shaping:A New Perspective on Cognitive Radio-Part I :Coexistence with Coded Legacy Transmission[J]. IEEE Transaction on Communication, 2010,58(6):1857-1867.
- [7] Quan Z,Cui S G,Sayed A H. Optimal linear cooperation for spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2008,2(1):28-40.
- [8] Gastpar M. On capacity under receive and spatial spectrum-sharing constraints[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2007,53(2): 471-487.
- [9] Han T,Kobayashi K. A new achievable rate region for the interference channel[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 1981,27(1):49-60.

作者简介:



李 滔(1986-),男,成都市人,在读硕士研究生,研究方向为多媒体通信.email:oatil1986@163.com.

徐家品(1957-),男,成都市人,教授,研究方向为多媒体通信.

(上接第 168 页)

- [5] Cutler L S,Searle C L. Some Aspects of the Theory and Measurement of Frequency Fluctuations in Frequency Standards[C]// Proceeding of the IEEE. [S.l.]:IEEE, 1966:136-154.
- [6] Leeson D B. A Simple Model of Feedback Oscillator Noise Spectrum[J]. Proceeding of the IEEE, 1966,54(2):329-330.
- [7] Meyer D G. An Ultra Low Noise Direct Frequency Synthesizer[C]// John Fluke Mfg-Company Seattle. Washington:[s.n.], 1970:209-232.

作者简介:



张贵福(1977-),男,黑龙江省绥化市人,硕士,助理研究员,主要从事微波频率源、雷达系统研究.email:zhang_agui@163.com.

黄 祥(1985-),男,广西钦州人,研究实习员,主要从事微波毫米波频率源研究.

曾耿华(1982-),男,江西临川人,助理研究员,主要从事微波电路、雷达系统研究.