

文章编号:1000-582X(2009)10-1236-05

# 具有嵌套结构的串行多径干扰抵消 RAKE 接收机

张东红<sup>1,2</sup>, 廖桂生<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学 雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071; 2. 安康学院 应用数学系, 陕西 安康 725000)

**摘要:**提出了一种具有嵌套结构的 RAKE 接收机(嵌套式 RAKE 接收机),该接收机基于串行干扰抵消技术对支路依次解调,当前支路与已解调支路构成 RAKE 子结构,各 RAKE 子结构具有嵌套关系。最新数据估计由 RAKE 子结构各支路的解调器输出按照最大比值合并后判决给出。支路再生信号的数据估计更新通过最新数据估计的替换来实现。对嵌套式 RAKE 接收机进行了性能分析。理论分析和仿真实验表明,嵌套式 RAKE 接收机能够很好的抑制多径干扰,改善误码性能,结构简单且易于实现。

**关键词:**串行干扰消除;嵌套结构;RAKE 接收机;多径干扰;误码性能

中图分类号:TN914.4

文献标志码:A

## Multipath interference cancellation RAKE receiver with nested structure

ZHANG Don-hong<sup>1,2</sup> LIAO Gui-sheng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, P, R. China;  
2. Department of Applied Mathematics, Ankang University, An'kang, Shanxi 725000, P, R. China)

**Abstract:** A multipath interference cancellation RAKE receiver with nested structure is proposed based on successive interference cancellation method. In the proposed method, the present branch and the demodulated branch form a substructure of the RAKE receiver, while the RAKE substructures are nested. The data estimate of the present branch is obtained by the maximum ratio combination of the demodulator output in the corresponding RAKE substructure. The update of the regeneration signal is achieved by replacing the previous branch data with the present branch data estimate. Performance of the new RAKE receiver was analyzed. Theoretical analysis and simulation results show that the new RAKE receiver with simple structure and easy implementations can suppress the multipath interference and improves the BER performance.

**Key words:** successive interference cancellation; nested structure; RAKE receiver; multipath interference; BER performance

在无线信道中,多径传播效应造成接收信号相互重叠,产生信号波形间的相互干扰,使接收端判断

错误,严重影响信号传输的质量<sup>[1]</sup>。文献[2]分析了扩频通信中多径干扰对接收性能的影响,文献[3]讨

收稿日期:2009-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60736009);教育部新世纪优秀人才基金资助项目;陕西省教育厅专项科研基金资助项目(08JK208)

作者简介:张东红(1972-),男,西安电子科技大学副教授,博士研究生,主要从事阵列信号处理,自适应信号处理及其在移动通信中的应用方向研究,(Tel)09158959157;(E-mail)zdh7218@sina.com.cn。

论了多种抗多径技术。为了抵消信号自干扰, CDMA 接收机采用了 RAKE 分集接收技术来区分和绑定多路信号能量。RAKE 接收机利用经过各条路径到达的信号能量获得分集增益来提高接收性能,已经成为第三代通信系统中有效的抗多径关键技术<sup>[4-6]</sup>。然而由于多路信号能量不相等,信号能量的分散将使得信道估计精确度降低,RAKE 的接收性能下降就会很快,对此,RAKE 接收机与多用户检测器结合用于抗多径干扰得到了广泛的研究<sup>[7-13]</sup>。文[7]给出了一种基于导频的串行多径抵消(SMPIC)RAKE 接收机,用于重构支路信号的临时数据估计仅利用该支路的解调器输出进行判决,当减去的干扰是基于重构信号错误的比特判决时,则干扰的功率将增大 4 倍<sup>[1]</sup>,从而会降低所有剩余支路临时数据判决的误码性能,影响干扰抵消性能,因此,临时数据估计的误码性能改善显的尤为重要。

干扰抵消技术在 CDMA 多用户检测系统中有着广泛的应用<sup>[14-18]</sup>。串行干扰抵消技术<sup>[17-18]</sup>采用串行的去干扰方式,一般由多级组成,实现设备结构简单,运算复杂度与用户数成线性关系。提出了一种具有嵌套结构的串行多径干扰抵消 RAKE 接收机(嵌套式 RAKE 接收机),不同于文献[7],用于重构支路信号的临时数据判决由接收机中相应的 RAKE 子结构给出。与传统 RAKE 以及基于 SMPIC 的 RAKE 的接收性能进行了理论比较和分析,并给出了仿真结果。

## 1 系统模型及传统 RAKE 接收机

在上行链路中,用户的数据首先经过调制,BPSK 调制后的符号经过扩频后形成发送信号,设第  $k$  个用户发送的等效基带信号为

$$x_k(t) = A_k b_k(t) s_k(t) \cos(\omega_c t + \varphi_k), \quad (1)$$

式中  $A_k$ ,  $b_k(t)$  和  $s_k(t)$  分别表示用户  $k$  的发送信号幅度、信息流和扩频波形,  $\omega_c$  和  $\varphi_k$  分别为载波频率和信号相位。扩频增益  $N = \frac{T_b}{T_c}$ , 其中,  $T_b$  和  $T_c$  分别表示为用户信息流中符号宽度和扩频码片宽度。

用户  $k$  的发送信号经过一个瑞利衰落的多径信道

$$h_k(t) = \sum_{l=1}^L \alpha_{kl} \delta(t - \tau_{kl}) e^{j\varphi_{kl}}, \quad (2)$$

式中  $\alpha_{kl}$ ,  $\tau_{kl}$  和  $\varphi_{kl}$  分别表示用户  $k$  的第  $l$  条路径的损耗、时延和相位;  $\alpha_{kl}$  服从 Rayleigh 分布;  $\varphi_{kl}$  服从  $[0, 2\pi]$  内的均匀分布;  $\delta(t)$  是单位冲激响应函数;

$L$  是多径信道中可分解的路径数;记  $\Delta$  为最大的和最小的多径时延扩展之差,考虑没有码间串扰的情况,即  $\Delta < T_b$ , 并假设  $\tau_{kl}$  在  $[0, T_b]$  内均匀分布。

基站接收到的所有用户的信号加上噪声为

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L A_k \alpha_{kl} b_k(t - \tau_{kl}) s_k(t - \tau_{kl}) \cos(\omega_c t + \varphi_{kl}) + n(t), \quad (3)$$

式中  $n(t)$  是双功率谱密度为  $\frac{N_0}{2}$  (W/Hz) 的零均值高斯白噪声。

假设对应于第一个用户的传统 RAKE 接收机能理想地捕获多径信号,则经过相关解调后,传统 RAKE 接收机的第  $j$  条支路的判决变量为

$$\xi_{1,j} = \int_0^{T_b} r(t) s_1(t - \tau_{1,j}) \cos(\omega_c t + \varphi_{1,j}) dt, \quad (4)$$

把式(3)代入式(4),  $\xi_{1,j}$  进一步可以表示为

$$\begin{aligned} \xi_{1,j} = & b_1(0) \frac{A_1 T_b a_{1,j}}{2} + \frac{A_1}{2} \sum_{l=1, l \neq j}^L a_{1,l} C_{1,l} \cos(\varphi_{1,l} - \varphi_{1,j}) + \\ & \frac{A_1}{2} \sum_{k=2}^K \sum_{l=1}^L a_{k,l} C_{1,k} \cos(\varphi_{k,l} - \varphi_{1,j}) + \\ & \int_0^{T_b} n(t) s_1(t - \tau_{1,j}) \cos(\omega_c t + \varphi_{1,j}) dt, \end{aligned} \quad (5)$$

这里,  $C_{1,k} = b_k(-1) R_{1,k}(t_{k,l}) + b_k(0) \tilde{R}_{1,k}(t_{k,l})$ , 其中,  $t_{k,l} = \tau_{k,l} - \tau_{1,j}$ ;

$R_{1,k}(\tau) = \int_0^{\tau} s_1(t) s_k(t - \tau) dt$ ;  $\tilde{R}_{1,k}(\tau) = \int_{\tau}^{T_b} s_1(t) s_k(t - \tau) dt$ ;  $b_k(-1)$  和  $b_k(0)$  是第  $k$  个用户信号中连续的 2 个数据符号。式(5)中第一项为所需信号,第二项是其他  $L-1$  条路径产生的多径干扰,即自干扰,第三项为多址干扰,最后一项为高斯噪声项。

RAKE 接收以后一般采用最大比值合并,其输出为

$$\xi_1 = \sum_{j=1}^L \omega_{1,j} \xi_{1,j}, \quad (6)$$

其中  $\omega_{1,j}$  为加权系数,根据对应的信号能量在  $L$  个相关器输出的信号总能量中所占的比重来选择。

## 2 嵌套式 RAKE 接收机

串行干扰抵消是一种基于信号重构的干扰抵消方式,干扰抵消的性能受到重构信号的振幅,定时,相位等估值以及对重构信号判决的影响。即使重构信号的振幅,定时,相位等估值准确,当减去的干扰是基于重构信号错误的比特判决时,则干扰的功率将增大 4 倍,从而影响干扰抵消性能,因此,重构信号临时判决的误码性能对串行干扰抵消性能的改善显的尤为重要。

提出一种具有嵌套结构的串行多径干扰抵消 RAKE 接收机,简称嵌套式 RAKE 接收机,其原理框图如图 1 所示。在图 1 中,解调器单元用来捕获信道中一条可分解路径,与扩频信号进行相关解扩;合并单元将第 1 支路至第  $j$  支路的解调器单元的输出按照最大比值合并,合并后的输出作为第  $j$  支路的临时判决统计量,而支路信号再生单元完成第  $j$  支路信号的再生以及支路 1 至支路  $j-1$  的再生信号的更新;延迟,干扰抵消单元将信道输入信号减去更新的各再生支路信号,得到去掉了部分自干扰的接收信号。

从图 1 可以看到,支路 1 至支路  $j$  通过合并单元构成一个 RAKE 结构,称为嵌套式 RAKE 接收机的第  $j$  个 RAKE 子结构。显然,第  $j$  个 RAKE 子结构嵌套着第  $j-1$  个 RAKE 子结构,第  $j$  支路的临时判决统计量为第  $j$  个 RAKE 子结构的输出。

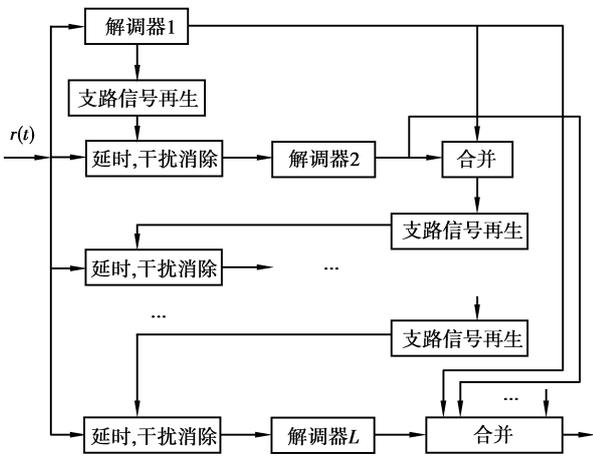


图 1 嵌套式 RAKE 接收机原理框图

不妨假设用户 1 为期望用户,支路 1 的解调器输出

$$Z_{1,1} = \int_0^{T_b} r(t) s_1(t - \tau_{1,1}) dt$$

此时,第 1 支路的临时判决统计量为  $Z_{1,1}$ ,临时判决

$$\hat{b}_{1,1}(t - \tau_{1,1}) = \text{sgn}(Z_{1,1}),$$

通过支路信号再生单元恢复的第 1 支路信号为

$$\hat{r}_{1,0}(t) = \hat{\alpha}_{1,1} \hat{b}_{1,1}(t - \tau_{1,1}) s_1(t - \tau_{1,1}) \cos(\omega_c t + \varphi_{1,1}), \quad (7)$$

接收信号  $r(t)$  减去第 1 支路的再生信号  $\hat{r}_{1,0}(t)$ ,得支路 2 的输入信号

$$r^{(1)}(t) = r(t) - \hat{r}_{1,0}(t), \quad (8)$$

则支路 2 的解调器输出为

$$Z_{1,2} = \int_0^{T_b} r^{(1)}(t) s_1(t - \tau_{1,2}) dt, \quad (9)$$

支路 2 的临时判决统计量

$$D_{1,2} = G_{1,2} Z_{1,1} + G_{2,2} Z_{1,2}, \quad (10)$$

其中,  $G_{j,2} (j=1,2)$  是  $Z_{1,1}$  和  $Z_{1,2}$  按照最大比值合并所确定的加权系数。用户 1 在支路 2 的临时判决为

$$\hat{b}_{1,2}(t - \tau_{1,2}) = \text{sgn}(D_{1,2}), \quad (11)$$

通过再生支路信号单元,恢复第 2 支路信号,同时利用第 2 支路的临时判决  $\hat{b}_{1,2}$  替代第 1 支路的临时判决  $\hat{b}_{1,1}$  实现对第 1 支路再生信号  $\hat{r}_{1,0}(t)$  的第一次更新。此时第 2 支路再生信号为

$$\hat{r}_{2,0}(t) = \hat{\alpha}_{1,2} \hat{b}_{1,2}(t - \tau_{1,2}) s_1(t - \tau_{1,2}) \cos(\omega_c t + \varphi_{1,2}), \quad (12)$$

$\hat{b}_{1,1} \hat{b}_{1,2}$  乘以式(7)后得到  $\hat{r}_{1,0}(t)$  的第一次更新

$$\hat{r}_{1,1}(t) = \hat{\alpha}_{1,1} \hat{b}_{1,2} s_1(t - \tau_{1,1}) \cos(\omega_c t + \varphi_{1,1}), \quad (13)$$

接收信号减去支路 1 的更新信号和支路 2 的再生信号,得到支路 3 的输入信号

$$r^{(2)}(t) = r(t) - \hat{r}_{1,1}(t) - \hat{r}_{2,0}(t) = r(t) - \hat{b}_{1,1} \hat{b}_{1,2} \hat{r}_{1,0}(t) - \hat{r}_{2,0}(t),$$

同理,可以推出支路  $m$  的输入信号

$$r^{(m-1)}(t) = r(t) - \sum_{j=1}^{m-1} \hat{r}_{j,m-j-1}(t) = r(t) - \sum_{j=1}^{m-1} (\hat{b}_{1,j} \hat{b}_{1,m-1} \hat{r}_{j,0}(t)), \quad (14)$$

这里,  $\hat{r}_{j,m-j-1}(t)$  的第一下标表示再生信号所在支路,第二下标代表再生信号的更新次数;  $\hat{b}_{1,j}$  表示用户 1 在支路  $j$  的临时判决。由式(14)可以看到,第 1 支路至第  $m-2$  支路再生信号的临时数据判决  $\hat{b}_{1,j} (j=1,2,\dots,m-2)$  都更新为第  $m-1$  支路的临时数据判决  $\hat{b}_{1,m-1}$ ,其中,第 1 支路的再生信号更新次数最多,共有  $m-2$  次。

当  $m < L$  时,类似式(10),第 1 支路至第  $m$  支路解调器的输出按照最大比值合并,得到第  $m$  支路的临时判决统计量

$$D_{1,m} = \sum_{j=1}^m G_{j,m} Z_{1,j}, \quad (15)$$

其中,  $G_{1,1} = 1, Z_{1,j} = \int_0^{T_b} r^{(j-1)}(t) s_1(t - \tau_{1,j}) dt$ 。

临时判决为

$$\hat{b}_{1,m} = \text{sgn}(D_{1,m}), \quad (16)$$

当  $m=L$  时,  $D_{1,L}$  为期望用户 1 的判决统计量,此时,用户 1 的判决为

$$\hat{b}_1 = \text{sgn}(D_{1,L}). \quad (17)$$

### 3 性能分析

从式(5)、(6)容易看到,传统 RAKE 接收机是

把式(5)中除第一项以外的其余各项近似看作加性高斯噪声进行处理。对于造成式(5)的多径干扰,文献[5]提出了一种采用串行干扰抵消的 RAKE 接收机结构,称为基于 SMPIC 的 RAKE 接收机,通过消除部分自干扰,使得 RAKE 接收机性能有了较大提高。基于 SMPIC 的 RAKE 接收机是以支路的解调器输出作为该支路的临时判决统计量,并利用判决结果再生该支路信号,显然,当判决错误时,就会降低其后每一支路的干扰抵消性能。

在嵌套式 RAKE 接收机中,如果令

$$r^{(m-1)}(t) = r(t) - \sum_{j=1}^{m-1} \hat{r}_{j,0}(t); \quad (18)$$

$$D_{1,m} = \begin{cases} Z_{1,j}, & m \neq L \\ \sum_{j=1}^m G_{j,m} Z_{1,j}, & m = L \end{cases}; \quad (19)$$

式(18)意味着每个支路的再生信号不作更新,而式(19)表明除第  $L$  支路外的每个支路临时判决统计量为该支路的解调器输出。此时该嵌套式 RAKE 接收机就转化为基于 SMPIC 的 RAKE 接收机。

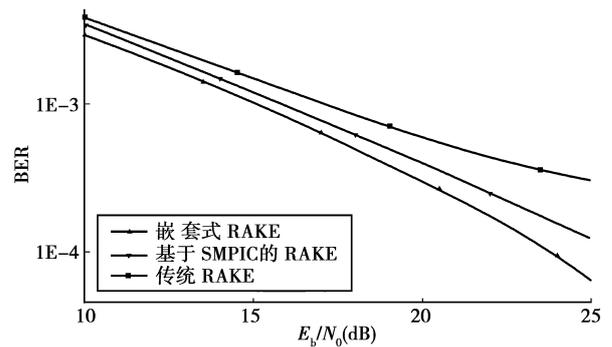
不妨记用户 1 在嵌套式 RAKE 接收机和基于 SMPIC 的 RAKE 接收机中第  $m$  支路的临时数据判决的误码率分别为  $P_{1,m}$  和  $\bar{P}_{1,m}$ ,显然,  $P_{1,L}$  和  $\bar{P}_{1,L}$  分别表示用户 1 在嵌套式 RAKE 接收机和基于 SMPIC 的 RAKE 接收机的误码率。记用户 1 在传统 RAKE 接收机的误码率为  $\tilde{P}_{1,L}$ 。嵌套式 RAKE 接收机利用其第  $m$  个 RAKE 子结构的输出对支路  $m$  进行临时数据判决,已再生的第 1 支路至第  $m-1$  支路的信号利用第  $m$  支路的临时数据判决进行更新,基于 SMPIC 的 RAKE 接收机则利用其第  $m$  支路的解调器输出对该支路做临时数据判决。由于合并增益与分集支路数成正比<sup>[4]</sup>,故有  $P_{1,m} < \bar{P}_{1,m}$ ,从而  $P_{1,L} < \bar{P}_{1,L}$ ,  $P_{1,L} < \tilde{P}_{1,L}$ 。这表明,嵌套式 RAKE 接收机比传统 RAKE 接收机以及基于 SMPIC 的 RAKE 接收机具有更好的误码性能。

### 4 仿真分析

为了着重考察多径自干扰的影响以及多径干扰抵消对链路性能改善的情况,将多用户干扰近似为 AWGN 处理。仿真参数:采用 Gold 扩频码,码片速率为 7.5 Mcps,扩频增益为 31;信息速率为 242 kb/s;移动台速度在 120 km/h;信道噪声为加性高斯白噪声;采用最大比值的 RAKE 合并;多径数为 4;Rayleigh 信道总体平均功率归一化为 1。

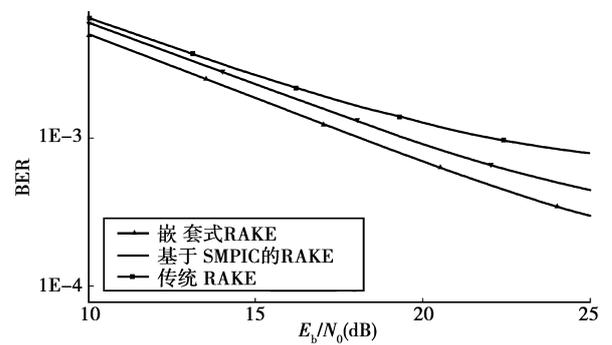
图 2、图 3 分别给出了传统 RAKE 接收机,嵌套式 RAKE 接收机以及基于 SMPIC 的 RAKE 接收

机在 4 条路径的平均功率依次为 0、0、0、0 dB 以及 0、-3、-6、-9 dB 时性能比较曲线。比较图 2、图 3 可知,同一个 RAKE 接收机在路径功率相等时的性能要优于路径非等强度时的性能,这是由于路径平均功率太低时,由此路径产生的分集增益本身不大,因而 RAKE 接收机对链路性能的改善就不显著。不论在路径功率相等还是各条路径非等强度的情况下,嵌套式 RAKE 接收机的性能最好,而传统 RAKE 接收机性能最差,这表明,串行干扰抵消技术能够很好的抑制多径自干扰,从而使链路的性能得到改善,与基于 SMPIC 的 RAKE 接收机相比,嵌套式 RAKE 接收机对于自干扰抵消的效果更佳。



注:信道中 4 条路径的相对平均功率为:0, 0, 0, 0 dB

图 2 3 种 RAKE 接收机的性能比较



注:信道中 4 条路径的相对平均功率为:0, -3, -6, -9 dB

图 3 3 种 RAKE 接收机的性能比较

### 5 结 论

提出了一种具有嵌套结构的 RAKE 接收机,该接收机利用串行干扰抵消技术来消除多径干扰。理论分析和仿真结果均表明,嵌套式 RAKE 接收机能够很好的抑制多径干扰,改善链路的性能,与传统 RAKE 接收机和基于 SMPIC 的 RAKE 接收机相比,具有更好的误码性能。

## 参考文献:

- [1] VERDU S. Multiuser detection[M]. VK: Cambridge University Press, 1998.
- [2] TORIERI D J. Performance of direct-sequence systems with long pseudonoise sequence[J]. IEEE 1992, 10(4): 770-781.
- [3] TURIN G L. Introduction to spread - spectrum antimultipath techniques and their application to urban digital radio[J]. IEEE, 1980, 68(3): 328-353.
- [4] AMDOH H, SAWAHASHI M, ADACHI F. Channel estimation filter using time-multiplexed pilot channel for coherent RAKE combining in DS-CDMA mobile radio [J]. IEICE Trans on Commun, 1998, 81(7): 1517-1525.
- [5] ROMANO F, CALLIGANIL A. An efficient RAKE receiver architecture with pilot signal cancellation for downlink communications in DS-CDMA indoor wireless networks[J]. IEEE Trans on Commun, 1999, 47(6): 823-827.
- [6] MOE Z W, ZORAN A K. Impact of spreading bandwidth on rake reception in dense Multipath channels [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(10): 112-117.
- [7] 胡荣, 黄爱苹, 王洪玉, 等. 采用多径干扰抵消的 RAKE 接收机[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(6): 773-780.  
HU RONG, HUANG AI-PING, WNAG HONG-YU, et al. Multipath interference cancellation and modified RAKE receiver[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2002, 24(6): 773-780.
- [8] 唐友喜, 李少谦, 李英涛. 无线移动信道中 Rake 接收机的多径分辨系数[J]. 通信学报, 2003, 24(1): 117-123.  
TANG YOU-XI, LI SHAO-QIAN, LI YING-TAO. Multipath distinguish factor of Rake receiver in mobile radio channels[J]. Journal on Communications, 2003, 24(1): 117-123.
- [9] 刘拥军, 苟彦新, 程国兵, 等. DS-CDMA 中基于 MMSE 相关器的 RAKE 接收机[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(3): 407-410.  
LUI YONG-JUN, GOU YAN-XIN, CHENG GUO-BING, et al. MMSE correlator based RAKE receiver for DS-CDMA [J]. Journal of electronics and information technology, 2005, 27(3): 407-410.
- [10] 叶礼兵, 周渊平, 谢宁. 一种 CDMA 循环分级式自适应 Rake 接收机[J]. 通信学报, 2005, 26(6): 49-56.  
YE LI-BING, ZHOU YUAN-PING, XIE NING. Iterative multistage adaptive Rake receiver for CDMA wireless system[J]. Journal on Communications, 2005, 26(6): 49-56.
- [11] 李向阳, 袁东风. 宽带系统中低复杂度 RAKE 接收机的性能研究[J]. 山东大学学报, 2006, 36(1): 103-110.  
LI XIANG-YANG, YUAN DONG-FENG. Performance analysis of low complexity RAKE receiver in ultra - wideband system[J]. Journal of Shandong University, 2006, 36(1): 103-110.
- [12] 谭晓衡, 唐马可, 陈丽, 等. 基于 DMF 的 Rake 接收机的捕获性能分析[J]. 重庆大学学报, 2007, 30(5): 43-48.  
TAN XIAO-HENG, TANG MA-KE, CHEN LI, et al. Study of acquisition in a rake receiver based on digital matched - filter [J]. Journal of Chongqing University, 2007, 30(5): 43-48.
- [13] 郭锋. 基于空分 RAKE 接收机的超宽带信号多径性能分析[J]. 计算机仿真, 2006, 23(4): 322-325.  
GUO FENG. BER performance of rake receivers for UWB signals in multipath channels [J]. Computer Simulation, 2006, 23(4): 322-325.
- [14] VAR ANASI M K, AAZHANG B. Multistage detection in asynchronous code - division multiple access communications [J]. IEEE Transactions on Commun, 1990, 38(4): 509-519.
- [15] ANDREWS J G. Interference cancelation for celular systems: A contemporary overview [J]. IEEE Wireless Commun, 2005, 12(2): 19-29.
- [16] SHYY D J, DUNYAK J. Capacity enhancement of CDMA net - works using interference cancellation techniques[J]. IEEE Transactions on Commun, 2006, 42(7): 86-92.
- [17] MOS HAVI S. Multi-user detection for DS-CDMA communications [J]. IEEE Communications Mag, 1996, 34(1): 124-136.
- [18] PULIN P, JACK H. Analysis of a simple successive interference cancellation scheme in a DS/CDMA system[J]. IEEE J Select Areas Commun, 1994, 12(5): 2477-2484.

(编辑 侯 湘)