

# HFC上行信道S-CDMA接入的多用户检测\*

郑 勇\*\* 周正华 朱维乐

(电子科技大学电子技术系 成都 610054)

**【摘要】**分析了HFC上行信道的特点,提出使用S-CDMA技术可以在极低的信噪比下获得稳固的传输特性。讨论了多种检测接收方案,并将解相关判决反馈多用户检测算法应用于HFC上行信道S-CDMA系统的接收,利用消除强功率信号的干扰达到弱功率信号的正确判决,达到有效地消除多址干扰和抗远近效应目的。其算法的复杂性与用户数成正比,每个用户只需作一次判决。系统不需要精确的同步和功率控制,从而简化了系统。

**关键词** 混合光纤同轴网; 同步码分多址; 多址干扰; 解相关判决反馈检测

**中图分类号** TN911

CATV网由于丰富的频宽资源和广泛的应用性,可作为引入社区宽带网络业务的一条最合适的路径。下行数据可占用一个8 M信道,由于信道质量较好,可以选用效率较高的调制方式如QAM64,数据率高达34 Mbps,而上行信道的频谱安排在5~42 MHz,易受各种干扰的影响,汇聚噪声漏斗效应严重,因此关键的问题是上行信道的传输设计。而QPSK调制比较容易实现,但抗窄带干扰性能差,为了有效地利用这个上行频段,必须选用抗窄带干扰性能好的一种传输方式<sup>[1,2]</sup>。

本文针对HFC即CATV上行信道的特点给出上行传输的物理层设计,采用基于直接序列扩频的DS-SS-CDMA接入,可以对窄带干扰和单音干扰有很强的抵抗能力,但由于CDMA多用户接入将导致多址干扰(MAI),特别是对HFC上行信道存在明显的“远近效应”,所以需要合适的多用户检测方案以消除多址干扰,最优检测能完全消除多址干扰,但却以复杂性与用户数成指数增长为代价,难以实现。根据实际系统用户信号的功率和同步等特点,本文采用解相关判决反馈多用户检测器,通过分析和仿真比较,表明这是最适用于HFC上行传输的一种检测方案。

## 1 系统分析和多用户CDMA信号模型

HFC网络频段划分中,上行信道安排在低频段5~42 MHz范围,该频段易受各种噪声和干扰的影响,包括内部噪声和外部噪声。内部噪声由器件本身产生,主要表现在热噪声的积累上;外部噪声分为脉冲噪声、窄带短波噪声等。由于上行信道是多点到一点的网络,各支路放大器的级连噪声和来自用户端的噪声在上行信道中积累,使前端形成所谓的噪声“漏斗”效应。

DS-SS-CDMA由于其频谱扩展特性对各种窄带干扰有很强的抵抗性,在低信噪比的情况下仍可获得较好的传输性能。然而大多数的DS-SS-CDMA采用异步方式,只有采用十分复杂的多用户接收方案才能消除MAI,否则系统的频谱利用率将不及FDMA或TDMA<sup>[3]</sup>。

对于无线CDMA蜂窝移动通信系统,小区内的多址干扰和多径衰落是造成通信质量下降的主要原因,而HFC上行信道一般没有多径衰落影响,如何有效地抑制多址干扰是HFC上行信道调制的关键问题。相对于无线应用环境,HFC网络用户在地理上是固定的,并且从前端下行的数据采

2000年10月13日收稿

\* 信息产业部预研基金资助项目

\*\* 男 30岁 博士生

用广播形式，各用户端只需从下行数据流中就可以提取同步信息，因而容易实现准确的同步发送，所以采用同步CDMA有利于抑制多址干扰从而大大提高系统容量，并且将简化接收检测器。

假设同步CDMA系统有K个用户，每个用户预先分配扩频信号波形为  $c_m(t)$ ,  $m=1,2,\dots,K$ ，在一个符号周期  $[0, T]$  有

$$\frac{1}{T} \int_0^T c_m^2(t) dt = 1$$

第m个用户发送信号为

$$s_m(t) = A_m b_m c_m(t) \tag{1}$$

假设K个用户同步发送，则接收端输入为

$$r(t) = \sum_i \sum_{m=1}^K b_m^{(j)} A_m c_m(t) + n(t) \tag{2}$$

式中  $b_m^{(j)}$  表示第j个时间间隔内第m个用户的值； $n(t)$ 是加性高斯白噪声，功率为  $\sigma^2$ 。不失一般性，本文仅考虑  $j=0$  的情况，则式(2)可简化为

$$r(t) = \sum_{m=1}^K b_m A_m c_m(t) \tag{3}$$

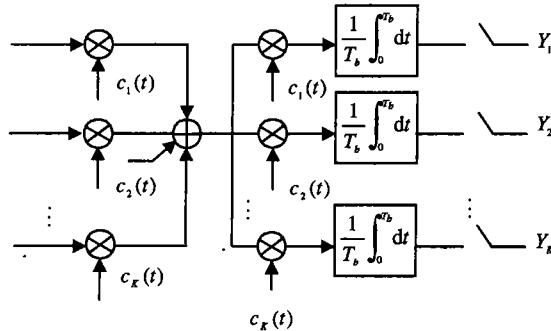


图1 等效的基带传输模型

等效的基带传输模型如图1所示，传统的检测器对接收信号  $r(t)$  采用K个相关器组，在单独的检测支路上使用各自的伪码波形  $c_i(t)$  与  $r(t)$  作相关运算，再经每隔  $T_b$  时间采样，得到软输出  $Y_i$ ，经判决装置得到硬判决数据的输出<sup>[4]</sup>。很明显，这种检测采用的是单用户检测方法，在每一支路上的检测都没有考虑其他用户信号的存在，因此没有分享多用户的信息，其性能取决于伪码的相关性，且需要伪码的自相关值远远大于互相关值。其相关值定义为： $\rho_{i,m} = \frac{1}{T} \int_0^T c_i(t) c_m(t) dt$ 。某一

数据bit间隔内第m个用户的匹配滤波器的输出为

$$y_m = \frac{1}{T} \int_0^T r(t) c_m(t) dt = A_m b_m + \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{i \neq m, i=1}^K A_i c_i(t) b_i c_m(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T n(t) c_m(t) dt = A_m b_m + \sum_{i \neq m, i=1}^K \rho_{i,m} A_i b_i + \frac{1}{T} \int_0^T n(t) c_m(t) dt = A_m b_m + MAI_m + z_m \tag{4}$$

令  $R = \begin{bmatrix} \rho_{1,1} & \dots & \rho_{1,K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{K,1} & \dots & \rho_{K,K} \end{bmatrix}$ ,  $A = \text{diag}[A_1, A_2, \dots, A_K]$ ,  $b = [b_1, b_2, \dots, b_K]^T$ , 则有

$$Y = RAb + Z \tag{5}$$

显然， $\rho_{m,m} = 1$ ，多址干扰  $MAI_m = \sum_{i \neq m, i=1}^K \rho_{i,m} A_i b_i$  是本地伪码与所有其他用户的相关产生，其大小取决

于伪码的互相关值  $\rho_{i,m}$  和系统的用户数  $K$ , MAI的存在对系统的容量和性能有重要的影响。文献[1,2]中提出的S-CDMA接入系统采用传统的单用户检测方案, 不考虑其他用户信号的影响, 而是认为依靠精确的同步发送和选用正交的扩频码可以完全消除多址干扰, 然而绝对的正交和完全的正交实际上是不可能获得的, 总是存在随机的时间偏差, 这使得各扩频信号波形之间不可能时时保持完全正交, 信号之间或多或少存在一定的相关值。当用户数增多或干扰用户功率增强时, 累积起来的MAI值就可能变得较大, 以致于影响判决, 造成误比特率上升, 甚至于系统检测性能恶化。

对于HFC网络, 虽然用户的位置在地理上是固定的, 但是各用户与前端的上行通道上有各种放大器、分配器和分支器, 匹配参数不同, 极易造成功率损耗的变化不同, 其结果是接收到的信号  $r(t)$  中各用户信号功率不一致, 甚至相差很大。对于弱功率用户信号, MAI将淹没其有用的信号成分, 检测性能将会恶化, 即“远近效应”十分明显。为了提高系统抗噪声抗窄带干扰的能力而采用CDMA接入, 但由于HFC网络存在明显的“远近效应”, 不能使用传统单用户检测, 还必须考虑适用的多用户检测方案。

## 2 多用户检测

如上所述, 为了提高系统容量和性能, 需要采用多用户检测, 而非文献[1,2]中传统的单用户检测方案。使用多用户检测器, 系统不需要精确的同步控制和功率控制, 从而简化了前端。最优检测器能完全消除MAI抗远近效应, 但其复杂性随用户数成指数增长而难于实现<sup>[5]</sup>。解相关检测器利用相关矩阵的逆矩阵  $L = R^{-1}$  应用于传统检测器的输出, 由式(5)易知该检测器的输出为

$$d_{dec} = R^{-1}y = Ab + R^{-1}Z = Ab + Z_{dec} \quad (6)$$

输出由解扩数据加一个噪声项组成, 没有多址干扰项MAI, 所以解相关检测可以完全消除MAI, 但其不利之处是噪声项  $R^{-1}Z$  的功率通常大于式(4)中的噪声项  $z_m$  的功率, 加强了噪声。虽然解相关检测比传统的单用户检测性能有明显提高, 可以抵抗远近效应, 也能完全消除MAI, 但却是以增强系统噪声功率为代价, 因此只适用于信噪比较高的场合。

各种多级检测器利用解相关器或传统单用户检测器的判决值对输入信号作负反馈, 再进行第二次判决, 性能较前两者要好, 但结构较为复杂<sup>[6]</sup>。本文使用同步CDMA解相关判决反馈多用户检测方案(DDFD), 性能优于基于传统单用户检测的多级检测器, 而与基于解相关的多级检测器近似, DDFD的结构比多级检测器简单, 因此是适用于HFC上行信道同步CDMA的多用户检测器。

假设已知各用户信号的能量, 考虑式(5), 对于  $Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_K]$  有  $|y_1| > |y_2| > \dots > |y_K|$ ,  $A = \text{diag}(A_1, A_2, \dots, A_K)$  有  $A_1 > A_2 > \dots > A_K$ 。显然  $R$  阵为正定对称矩阵, 可以将  $R$  分解成  $R = F^T F$ , 其中  $F$  为一下三角矩阵, 则式(5)可改写成  $Y = F^T FAb + Z$ , 将图1中匹配滤波器输出  $Y$  送入滤波器 ( $(F^T)^{-1}$ ) 得到输出矢量为

$$Y = FAb + n \quad (7)$$

式中  $n$  为高斯白噪声, 其自相关矩阵为  $R(n) = \sigma^2 I$  ( $I$  为  $K \times K$  单位矩阵), 由此得到图2所示的多用户检测器。

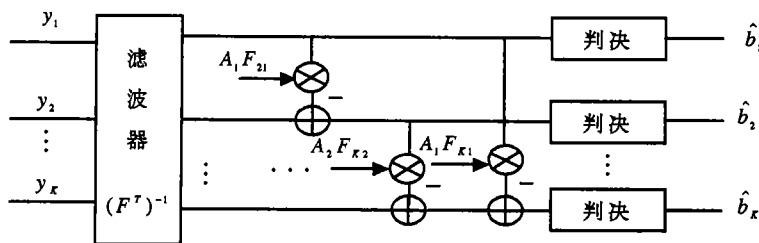


图2 解相关判决反馈检测器

考虑式(7), 将矩阵展开得到第 $m$ 个用户滤波器的输出为

$$\tilde{y}_m = F_{mm}A_m b_m + \sum_{i=1, i \neq m}^K F_{mi}A_i b_i + n \quad (8)$$

当 $m=1$ ,  $\tilde{y}_1 = F_{11}A_1 b_1 + n_1$  中没有包含多用户干扰, 由于  $y_1, y_2, \dots, y_K$  按能量大小降序排列, 则  $y_1$  为最强壮者, 对其判决也最简单:  $\hat{b}_1 = \text{sgn}[\tilde{y}_1]$ 。

当 $m=2$ ,  $\tilde{y}_2 = F_{22}A_2 b_2 + F_{21}A_1 b_1 + n_2$ , 其中仅包含用户1的干扰。而用户1的数据已经作出了判决, 因此将其代入式中, 即利用已判决出的用户数据进行负反馈, 再作用用户2的判决, 有  $\hat{b}_2 = \text{sgn}[\tilde{y}_2 - F_{21}A_1 \hat{b}_1]$ 。

类似地, 对于第 $m$ 个用户, 多址干扰只取决于功率比它强的用户  $1, 2, \dots, m-1$ , 此 $m-1$ 个用户信号已经作出了判决, 被用来构成负反馈, 再对第 $m$ 个用户信号作判决

$$\hat{b}_m = \text{sgn}\left[\tilde{y}_m - \sum_{i=1}^{m-1} F_{mi}A_i \hat{b}_i\right] = \text{sgn}\left[F_{mm}A_m b_m + \sum_{i=1}^{m-1} F_{mi}A_i (b_i - \hat{b}_i) + n_m\right] \quad (9)$$

由此可见, 这种判决反馈检测方法与ISI信道中使用的迫零判决反馈均衡器类似, 在系统完全同步下, 可以消除全部的多用户干扰, 假设先前判决均正确, 则第 $m$ 个用户的信噪比为

$$\text{SNR}_m = F_{mm}^2 A_m^2 / \sigma^2 \quad (10)$$

对于HFC上行信道采用CDMA接入, 存在明显的“远近效应”, 当干扰用户的信号功率很强时采取这种判决反馈的方法是很有用的, 该方法可以逐级去除强功率信号的干扰, 从而有利于弱功率信号的检测, 因此有很强的抗“远近效应”的能力, 其复杂性与用户数成正比。

### 3 性能分析和仿真结果

由式(10)可以得到DDFD第 $m$ 个用户的误比特率为

$$P_m(\text{DDFD}) = Q\left(\sqrt{\frac{F_{mm}^2 A_m^2}{\sigma^2}}\right) = Q\left(\frac{F_{mm} A_m}{\sigma}\right) \quad (11)$$

对于解相关检测器有误比特率<sup>[7]</sup>

$$P_{dec} = Q\left(\sqrt{\frac{A_m^2}{\sigma^2 (R^{-1})_{mm}}}\right) = Q\left(\frac{A_m}{\sigma} \sqrt{\frac{1}{(R^{-1})_{mm}}}\right) \quad (12)$$

1)  $m=1$ ,  $F_{11}^2 = 1/R_{11}^{-1}$ , 因为第一个用户没有利用反馈, 所以其误比特率应该和解相关检测器相同, 比较式(11)和式(12)知结论正确;

2)  $m>1$ ,  $F_{mm}^2 > 1/R_{mm}^{-1}$ , 比较式(11)和式(12)知DDFD的性能要优于解相关检测器;

3) 对于 $m=K$ , 即最后一个用户的信号,  $F_{mm}^2 = 1$ , 由式(10)可以看出其误比特率与系统中仅有一个用户的情况相同, 即有

$$P = Q\left(\sqrt{\frac{A_m^2}{\sigma^2}}\right) = Q\left(\frac{A_m}{\sigma}\right) \quad (13)$$

以上分析均是以先前判决正确为前提, 事实上无论用户信号的功率有多强, 其数据判决都存在一定的误码率, 下面对此作分析和仿真。

考虑一个两用户同步DS-CDMA系统, 信号互相关值为  $r = R_{1,2} = 0.7$ , 由1)知第一个用户的误比特率为  $P_1 = Q\left(\frac{A_1}{\sigma} \sqrt{1/(R^{-1})_{1,1}}\right)$ , 第二个用户判决器的输入为  $A_2 b_2 + A_1 r (b_1 - \hat{b}_1) + n_2$ , 通过对  $b_1 - \hat{b}_1$  的取值(-1, 0, 1)求概率平均, 可以得到第二个用户的误比特率为

$$P_2 = (1 - P_1)Q\left(\frac{A}{\sigma}\right) + \frac{P_1}{2}\left[Q\left(\frac{A_2 - 2rA_1}{\sigma}\right) + Q\left(\frac{A_2 + 2rA_1}{\sigma}\right)\right] \quad (14)$$

再考虑一个4用户系统, 用户信号的自相关矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 1 & -0.143 & 0.429 & 0.429 \\ -0.143 & 1 & 0.429 & -0.143 \\ 0.429 & 0.429 & 1 & -0.143 \\ 0.429 & -0.143 & -0.143 & 1 \end{bmatrix}$$

假设用户4的信噪比 $SNR(4) = 11$  dB, 其他用户的信噪比从11~17 dB变化, 对此作仿真, 结果如图3所示, 图中横坐标表示用户1~3与用户1的信噪比之差。从图中可以看出, 当用户1~3的信噪比增加时, DDFD用户4的误码率趋于单用户界, 并且始终低于解相关检测的误码率。

#### 4 结束语

本文针对HFC网络上行信道的特点, 提出使用扩频CDMA作为用户上行信号的接入方式, 可以有效地抵抗各种窄带干扰和噪声, 使用解相关判决反馈多用户检测可以有效地降低多址干扰, 经分析仿真表明, 这是解决HFC上行信道传输的一种有效方法。

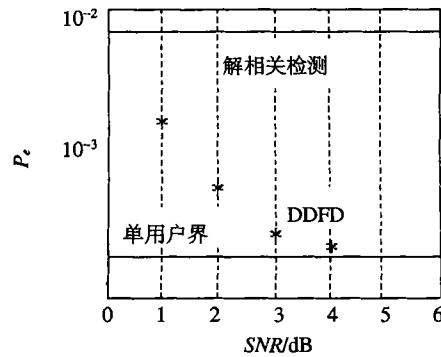


图3 仿真结果比较

#### 参考文献

- 1 Wolters R P C. A CDMA based bidirectional communication system for hybrid fiber-coax CATV networks, IEEE Transaction on Broadcasting, 1997, 43(2): 127~135
- 2 De Gaudenz R, Elia C. Bandlimited quasi-synchronous CDMA: a novel satellite access technique for mobile and personal communication systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1992, 10(2): 328~343
- 3 朱近康. 扩展频谱通信及其应用. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993
- 4 Wang Jiamei. Study of DWMT modulation techniques of HFC networks. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2000, 29(6): 600~603 [王嘉梅. HFC网中的离散小波多音频调制技术研究. 电子科技大学学报, 2000, 29(6): 600~603]
- 5 A D Hallen. Decorrelating decision-feedback multiuser detector for synchronous code-division multiple access channel. IEEE Transaction on Communications, 1993, 41(2): 285~290
- 6 Yang Dongli, Ye Wu. Turbo CDMA multi-user detection. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2000, 29(2): 247~251 [杨东林, 叶梧. Turbo CDMA 多用户检测的研究. 电子科技大学学报, 2000, 29(2): 247~251]
- 7 Moshavi Shimon. Bellcore, multi-user detection for DS-SS communications. IEEE Communications Magazine, 1996, 41(10): 124~136

(下转第235页)

- 7 Zhang Zhongpen, Yang Hong. Turbocodes multilevel modulation and their performance. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2000, 29(6):591~594.[张中培, 杨红. Turbo码多级调制及性能分析.电子科技大学学报, 2000, 29(6): 591~594]

## Study of Decoding Implementation of Turbo Codes in Third Generation Mobile Communication

Yang Hong      Xu Zhengwu      Zhang Zhongpei

(Inst. of Electronic Engineering, Inst. of Telecommunication & Information Eng., UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** On the basis of analysis on TURBO input quantification, this paper offers the electro-circuits and iteration electro-circuits for TURBO coding in the 3GPP, with existing MAP algorithm combined, thus improves the transmission rate of the 3GPP. The recently proposed TURBO codes are applied to multilevel modulation, then to multistage decoding. Based on the information theory, the method of designing rates and interleaving lengths of TURBO codes is proposed, which makes the lower levels codes have higher correct error capacities and the higher levels codes have higher transmission capacities. The coding of TURBO codes in the 3GPP is also analyzed and the delay problem and the scale problem of FPGA are discussed. The electro-circuit performs well in coding, which meets the gain demands of the 3GPP.

**Key words** TURBO codes; mobile communications; soft-output coding; branch metric

-----  
(上接第225页)

## Multuser Detector for HFC Upstream Channel Using S-CDMA Access

Zheng Yong      Zhou Zhenghua      Zhu Weile

(Dept. of Electronic Eng., UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** This paper analyzes the characteristic of HFC upstream channel, proposes that using S-CDMA can obtain stable transmission on the condition of very low SNR. S-CDMA has an ability to resist many kind of narrow-band interference and noises, but the multi-access interference induces the capacity and performance of the system. After analyzing several multuser detectors, this paper uses decorrelating decision-feedback detector in HFC upstream channel S-CDMA system. It can cancel the interference of the stronger users and make advantages to the decision of the weaker users, thus can cancel the multi-access interference and has better near-far resistance. Its complexity is linear in the number of users. The system need not accurate synchronization control, thus is simplified.

**Key words** hybrid fiber coaxial; synchronous-CDMA; multi-address interferer; decorrelating decision\_feedback detector