

射频模拟前端对数字中频接收机动态范围影响的研究

曹 鹏¹, 费元春²

(1. 北京印刷学院信息与机电工程学院, 北京 102600; 2. 北京理工大学信息科学与技术学院, 北京 100081)

摘 要: 射频模拟前端(RFAF)是实现大动态宽带数字中频接收机(DIFR)的技术瓶颈之一,其在很大程度上制约着 DIFR 的带宽、动态范围等关键性能指标. 本文研究实现宽带大动态 DIFR 的约束条件. 基于 ADC 的性能指标,分析了 RFAF 的噪声系数、带宽以及中频欠采样的“处理增益”与 DIFR 灵敏度之间的关系,以及 RFAF 的增益和噪声系数与 DIFR 的动态范围之间的关系. 推导并仿真了 RFAF 的增益和 ADC 的信噪比与 DIFR 的瞬时动态范围,以及数字自动增益控制(DAGC)的步长和调节范围与 DIFR 的扩展动态范围之间的关系. 讨论了 RFAF 的最优化设计问题,给出了设计实例.

关键词: 射频模拟前端; 宽带; 瞬时动态范围; 扩展动态范围

中图分类号: TN801, TN79+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007)12-2312-03

The Research on the Effect of the RF Analog Front End to the Large Dynamic Range and Broadband Digital Intermediate Frequency Receivers

CAO Peng¹, FEI Yuan-chun²

(1. School of Information and Mechanical Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China;

2. School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: RF Analog Front-end (RFAF) is one technique-bottleneck to realize the large dynamic range and broadband Digital Intermediate Frequency Receivers (DIFR), and could restrict the bandwidth, dynamic range and some other key parameters of the DIFR. It has been researched that the constraint condition for the broadband and large dynamic range of the DIFR. Based on the ADC parameters, the correlation expression for the following characters is given: the noise figure, bandwidth, “processing gain” of the under-sampling, and the sensitivity of the DIFR. The relational expression for the gain and noise figure of the RFAF and the dynamic range of the DIFR is also performed. It is reduced and simulated that the relationship between the gain of the RFAF, the signal-to-noise ratio of the ADC and the instantaneous dynamic range, and the step and adjust-range of the RF-DAGC and the extended dynamic range of DIFR. It is discussed the optimization design of RFAF, and provided a practical design example.

Key words: RF analog front-end; broadband; instantaneous dynamic range; extend dynamic range

1 引言

与传统超外差式接收机相比,数字中频接收机(DIFR)是对中频信号直接采样,然后在数字部分实现下变频、滤波、解扩、解调、信号识别和信息提取等功能.为了发挥 DIFR 强大的软件无线电功能,并使其能在复杂电磁环境中或电子干扰环境中进行可靠通信,要求 DIFR 必须具有宽带和大动态工作能力.目前,国内外对 DIFR 的研究主要集中在信号采集和数字信号处理方面^{[1]-[5]},本文主要研究制约 DIFR 带宽和动态范围的射频模拟前端(RFAF)的优化设计问题.分析了 RFAF 的增益、噪声系数与 DIFR 的带宽和动态范围之间的约束关系,给出了 RFAF 的增益、数字自动增益控制(DAGC)的步长、调节范围和 ADC 的信噪比与 DIFR 动态范围之间的关系式.讨论了 RFAF 的最优设计问题,以及 DAGC 的步长和调节范围对 DIFR 的瞬时动态范围、扩展动态范围及增益调节速度和稳定性的影响,给出了仿真结果和

设计实例.

2 DIFR 的动态范围

假设 DIFR 解调所需的最小信噪比为 SNR_{min} , RFAF 的噪声系数和带宽分别为 N_F , A/D 变换的采样频率为 f_s , 则 DIFR 的灵敏度为:

$$S = -174 + 10\lg B + SNR_{min} + N_F - 10\lg(f_s/2B) \quad (1)$$

DIFR 的动态范围可分为瞬时动态范围 P_{TD} 和扩展动态范围 P_{WD} . P_{TD} 是指当 RFAF 的增益不变,输入 DIFR 的最大不阻塞信号功率 $P_{max,TD}$ 和最小能可靠解调信号功率 $P_{min,TD}$ 之差. P_{WD} 是指通过 RF-DAGC 调节,输入 DIFR 的最大不阻塞信号功率 P_{max} 和最小能可靠解调信号

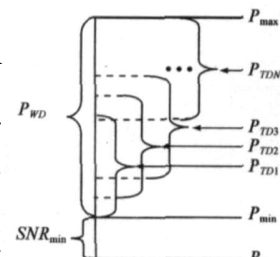


图 1 DIFR 的动态范围示意图

功率 P_{min} 之差. 如图 1 所示, P_{WD} 实质是在 RF-DAGC 控制

下进行 P_{TD} 的“搬移”(即: P_{TD1} P_{TD2} P_{TD3} ... P_{TDN}) 来实现动态范围的扩展^[6]。

图 1 中 P_N 为 A/D 变换输出的噪声功率, 为:

$$P_N = \max\{ P_{NQ}, P_{NA} \} \quad (2)$$

式中, P_{NQ} 是 ADC 的量化噪声, P_{NA} 是 ADC 的输入噪声。

$$P_{NQ} = 10 \lg \frac{V_F^2}{12 \times 2^{2(N-1)}} \text{ (dBm)} \quad (3)$$

$$P_{NA} = -174 + 10 \lg B + N_F + G_A \text{ (dBm)} \quad (4)$$

式中, V_F 是 ADC 的满度输入电平, N 是 ADC 的分辨率(高速 A/D 变换, N 代入有效分辨率 ENOB), N_F 和 G_A 分别是 RFAF 的噪声系数和增益。

对于一个给定的中频采样系统, 为了得到更大的动态范围, 要求 P_N 越低越好。假设 ADC 的量化噪声 P_{NQ} 一定, 对于带宽给定的 RFAF, 如果其增益设置合理, 噪声系数低, 且满足 $P_{NA} < P_{NQ}$, 则 $P_N = P_{NQ}$, P_{\min} 最小, DIFR 的动态范围最大, RFAF 的设计达到最优。如果 RFAF 的性能参数设计不合理, 增益和噪声系数较大, 使得 $P_{NA} > P_{NQ}$, 则 $P_N = P_{NA}$, P_{\min} 增大, DIFR 的动态范围减小, RFAF 的设计未达到最优。

RFAF 的最优设计是实现 DIFR 的最优设计的必要条件, 不是充分条件。主要是因为 DIFR 的动态范围受多方面因素影响, 如当采样时钟的抖动增大时, 将导致 A/D 变换的信噪比下降, 即量化噪声 P_{NQ} 增大, 当 P_{NQ} 大于 P_{NA} , P_N 就由 P_{NQ} 决定, 则 DIFR 的动态范围主要由 A/D 变换的信噪比决定。

3 瞬时动态范围

中频 A/D 变换的实际量化噪声比较复杂, 通常包括孔径抖动和积分非线性、微分非线性、谐波失真等引起的噪声, 可用下式求得:

$$P_{NQ} = 10 \lg \frac{V_F^2}{12 \times 2^{2(ENOB-1)}} \text{ (dBm)} \quad (5)$$

$$P_N = P_F - SNR_{ADC} \quad (6)$$

式中, P_F 是 ADC 的满度输入功率, SNR_{ADC} 是 ADC 的信噪比, $ENOB$ 是 ADC 的有效分辨率。假设 RFAF 设计最优, 满足 $P_{NA} < P_{NQ}$, 且 DIFR 解调信号所需的最小信噪比为 SNR_{\min} , 则 ADC 的最小有效输入功率 P_{\min_ADC} 为:

$$P_{\min_ADC} = P_N + SNR_{\min} = P_F - SNR_{ADC} + SNR_{\min} \quad (7)$$

为了更贴近实际情况, 计算 P_{\min_ADC} 时, 加入 5dB 的余量, 则:

$$P_{\min_ADC} = P_F - SNR_{ADC} + SNR_{\min} + 5 \text{ (余量)} \quad (8)$$

设 RFAF 的最佳增益为 G_B , 在此增益条件下, 天线端接收的最大不阻塞信号功率 P_{\max_RF} 分别为:

$$G_B = P_{\min_ADC} - P_{\min_RF} = P_{\min_ADC} - S \quad (9)$$

$$P_{\max_RF} = P_F - G_B \quad (10)$$

DIFR 的最大瞬时动态范围 P_{\max_TD} 为:

$$P_{\max_TD} = P_{\max_RF} - P_{\min_RF} = SNR_{ADC} - SNR_{\min} - 5 \text{ (余量)} \quad (11)$$

由式(11)知, 当 RFAF 的参数设计最优(增益设置最佳, 噪声系数最低)时, 使得 ADC 的输入噪声功率 P_{NA} 小于 ADC 的量化噪声 P_{NQ} , 则 DIFR 的动态范围最大, 且其最大瞬时动态范围 P_{\max_TD} 只与 ADC 的信噪比 SNR_{ADC} 和 DIFR 解调信号所需的最小信噪比 SNR_{\min} 有关。因此, 在中频采样系统和 RFAF 系统设置最优时, 如果要求 DIFR 的动态范围越大, 则需要 ADC 的分辨率越高。

4 扩展动态范围

扩展动态范围 P_{WD} 是在 RFAF 中接入 RF-DAGC 功能。DIFR 工作时, AGC 电路根据 ADC 输出信号的大小, 自动调节 RFAF 的增益, 实现 P_{TD} 的搬移。利用这种办法可以把 DIFR 的动态范围扩大 80 ~ 110dB, 但瞬时动态范围基本不变。RF-DAGC 电路一般采用接入 EAA(电调衰减器)实现, 如图 2 所示。假设 LNA 的增益 $G_1 = 10\text{dB}$, 噪声系数 $N_{F1} = 2.8\text{dB}$; 电调衰减器 EAA 为无源的, 插损 $G_L = 8\text{dB}$, 增益调节步长为 G_S , 最大衰减为 $G_{\max_2} = -63\text{dB}$, 噪声系数为 $N_{F2} = -G_2 = -(G_L + CG_S)$ (C 是控制 EAA 衰减量的增益控制代码), 并假设图 2 中 MAF 的噪声系数 $N_{F3} = 5\text{dB}$, 增益为 G_3 , 则 RFAF 的增益和噪声系数分别为:

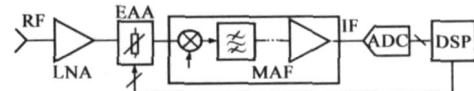


图 2 RF-DAGC 的框图

$$G = G_1 + G_2 + G_3 = G_1 - (G_L + CG_S) + G_3 \quad (12)$$

$$N_F = N_{F1} + (N_{F2} - 1) / G_1 + (N_{F3} - 1) / G_1 G_2 \quad (13)$$

根据(9)可推出 MAF 的最佳增益为:

$$G_{B_3} = P_{\min} - S - G_1 - G_L = P_F - SNR_{ADC} + SNR_{\min} - S + 3 \quad (14)$$

同理, DIFR 输入的最小可有效解调信号的功率 P_{\min_RF} 和最大不阻塞信号的功率 P_{\max_RF} 分别为:

$$P_{\min_RF} = P_F - SNR_{ADC} + SNR_{\min} - G_1 + G_L - G_{B_3} + 5 \text{ (余量)} \quad (15)$$

$$P_{\max_RF} = P_F - G_1 + (G_L + C_{\max} G_S) - G_{B_3} \quad (16)$$

$$P_{WD} = P_{\max_RF} - P_{\min_RF} = SNR_{ADC} - SNR_{\min} - 5 \text{ (余量)} + C_{\max} G_S \quad (17)$$

C_{\max} 是 EAA 的最大增益衰减码。显然, P_{WD} 通过 RF-DAGC 的调节, 比 P_{TD} 扩大了 $C_{\max} G_S$ (dB)。

5 DIFR 动态范围仿真

为了研究 DIFR 的动态范围与 ADC 的信噪比和

AGC 的步长之间的关系,假设中频采样 ADC 的信噪比 SNR_{ADC} 分别为 62dB, 67dB, 72.5dB, 且满度输入均为 4.8dBm. 代入(9)式, 求出 RFAF 的最佳增益分别为 55.5dB, 61dB, 66dB. 并且假设对应的 AGC 的步长 G_S 分别为 3dB, 6dB, 10dB, 代入(11), (12), (17)式进行仿真运算, 得出 RFAF 的增益曲线, 对应输入 ADC 的功率曲线分别为 (图 3). 由图 3 可知, 当 SNR_{ADC} 增大时, DIFR 的瞬时动态范围增大, RFAF 的最佳增益减小; 当 AGC 的步长 G_S 增大时, 进入 AGC 起控区, 上述各曲线的波动增大(锯齿波动增加), 瞬时动态范围受到一定影响. 但不难理解, RFAF 的工作更为稳定性, 由 AGC 引起的寄生调幅更小.

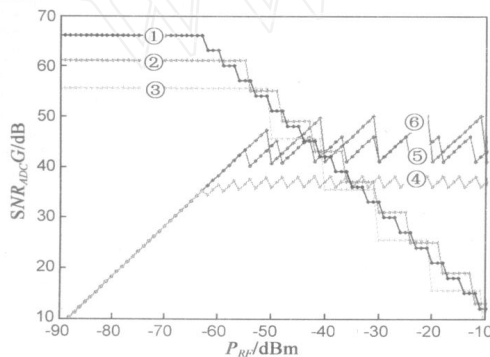


图 3 DIFR 的动态范围与 SNR_{ADC} 和 G_S 之间的关系曲线^[8]

6 RFAF 的设计实例

RFAF 的电路框图如图 4 所示, 该电路由射频和中频部分组成. RF-AGC 是对第一级下变频输出的射频信号进行相应处理后, 输出增益控制代码, 去自动调节射频电调衰减器 (EAA) 的衰减量. RF-AGC 的增益调节步长为 1dB, 插损为 3.5dB, 最大增益调节范围为 60dB. IF-AGC 是从中频 A/D 变换输出的数字信号中提取中频信号的幅度信息, 经过处理后, 生成 DVGA (数控可变增益放大器) 的增益控制代码去自动调节 DVGA 的增益, 实现 IF-AGC 功能. RFAF 的总增益设置根据(9)式计算出, 各部分的增益分配参见文献[6], 不再赘述.

7 结语

DIFR 的工作频带主要受本底噪声、接收灵敏度、中频采样的处理增益等因素的限制, 其灵敏度与工作带宽基本按每十倍频程 10dB 的速率降低. ADC 的信噪比和 RFAF 的增益主要决定 DIFR 的瞬时动态范围. 当 ADC 的信噪比一定时, 如果 RFAF 的增益增大, 则 DIFR 的瞬时动态范围减小. 或当 RFAF 的增益一定, 如果 ADC 的信噪比增大, 则 DIFR 的瞬时动态范围增大. RF-

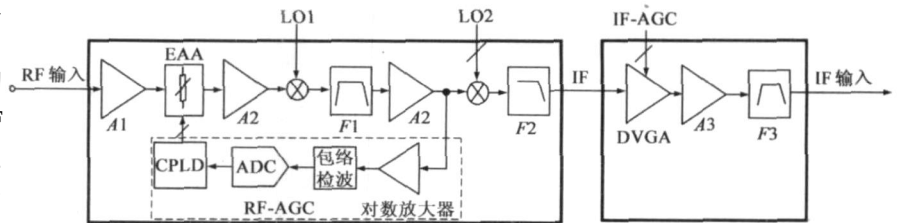


图 4 DIFR 的模拟前端框图

DAGC 的增益调节范围决定 DIFR 的扩展动态范围, 而其步长决定在 AGC 调节过程中锯齿状起伏的大小. 这种起伏越大, 则 DIFR 的瞬时动态范围受影响越大, 但 RFAF 的工作更稳定.

参考文献:

- [1] John J, Robert M, Joseph P. A smart software radio: Concept development and demonstration[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(4): 631 - 645.
- [2] Brad B. Basics of designing a digital radio receiver[DB/OL]. <http://www.analog.com>, 2002-01-12/2002-12-10.
- [3] Cheung, Tze Chiu. 2GHz W-CDMA radio transceiver[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- [4] Tim H, Matthias H, Gerhard F. The digital front-end of software radio terminals [J]. IEEE Personal Communications, 1999, (8): 40 - 45.
- [5] Hassan O, Mohammed I. Digitally programmable decibel-linear CMOS VGA for low-power mixed-signal applications[J]. IEEE Trans on Circuits and System-II: Analog and Digital Signal Processing, 2000, 47(5): 338 - 390.
- [6] Cao Peng, Chen Ning, et al. Optimization of a large dynamic range and broadband digital intermediate frequency receiver [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(4): 353 - 356.

作者简介:



曹鹏男, 1969 年生于宁夏彭阳县, 北京印刷学院教授, 2005 年获得北京理工大学博士学位, 已发表论文三十余篇, 获得国家级教学成果奖二等奖一项, 省部级教学成果奖一等奖一项. 主要研究现代数字通信技术、高速高精度信号采集及其处理技术. E-mail: pc @bigc.edu.cn



费元春女, 1938 年生于四川泸州市, 1960 年 7 月毕业于北京工业学院无线电系雷达专业, 现任北京理工大学电子工程系电磁场与微波专业首席教授, 博士生导师, 中国发明协会创造学会研究委员会委员, 兵工学报常务编委, 中国电子学会会士. 1988 年被授予国家级有突出贡献的专家称号.