

接收器技术的最新发展： 接收器百年创新史选编

作者：Brad Brannon

共享



第1部分：初期

虽然很多人都对早期无线技术的发展做出了贡献，但古列尔莫·马可尼 (Guglielmo Marconi) 却是其中的佼佼者。虽然他以无线技术而闻名，但很多人并不熟悉他在20世纪初创建的无线技术事业。在20世纪的头20年中，他建立了一项至关重要的事业，使无线世界走向了今天的方向。



图1 马可尼展示他的技术。

虽然他的商业化技术并不是最新的技术，而且技术发展迅速，但该技术已经足够好了，因为他想到了办法，知道如何利用现有技术来创造一个新的行业。20世纪初，殖民主义走向终结，战争和灾难大规模爆发，1912年4月，皇家邮轮泰坦尼克号沉没；值此世界大乱之际，马可尼着手部署一个全球网络，以便以无线方式发送和转发信息。泰坦尼克号沉没后，无线技术在救援幸存者和传播事故新闻方面发挥了积极作用，提升了这一新兴技术的重要性。公众和军方都意识到了无线技术的重要性，尤其是后来成为美国海军部长的约瑟夫·丹尼尔斯 (Joseph Daniels)。在美国及其他地区，像丹尼尔斯这样的领导认为，军方应将无线电国有化，确保他们在战争期间能使用无线电。必须记住，在此期间，唯一可用的频谱低于200 kHz左右。至少有一段时间，事情是朝着这个方向发展的，但在第一次世界大战之后，政府对无线技术的控制减弱，不过，这是在形成政府特许垄断权并因此成立美国无线电公司 (RCA) 之后。¹

根据我们的推测，马可尼时代的无线电非常原始。发射器采用火花隙装置（后来才使用机械交流发电机）产生射频，但在接收端，系统完全是无源的，由天线、谐振式LC调谐器和某种检波器组成。我们很快就会讨论这些检波器，但在当时，它们可能是机械式的，也有可能是化学式的或有机式的。其中一些系统通过电池对它们进行简单的偏置，但不提供任何电路增益，不同于今天。这些系统的输出被提供给某种头戴式耳机，把信号转换成音频，这种音频总是非常弱，不过是简单的咔哒声或嗡嗡声。

因为这些系统未在接收端提供增益，所以其有效范围取决于发射功率的大小、接收器的质量、操作员在调整方面的经验，当然还有大气条件。马可尼意识到，在可合理预测有效范围的情况下，可以建立一个站点网络，在大洲和大洋之间可靠地传递信息。其中包括在陆上和海上安装设备。马可尼开始在全球各地和海上安装无线电台，包括在客船和货船上。通过在航海船上安装无线电系统，他不仅使这些船只能与其在岸上的商业利益相关者进行沟通，而且还能在必要的地方提供中继和冗余，从而马可尼填补了其网络中的关键空白。

马可尼拥有的一项技术是早期的真空管。真空管公认的发明者约翰·安布罗斯·弗莱明 (John Ambrose Fleming) 曾为马可尼公司工作，但弗莱明和马可尼当时分析认为，他们现有的技术足以检测无线电信号。此外，他们认为，他的发现虽有好处，但尚不值得为阀管运行投入额外的资金或电池。马可尼已经拥有了数种信号检测技术，与阀管不同，这些技术不需要高功率来运行灯丝和加热板。因此，他们开始时放弃了这种技术。

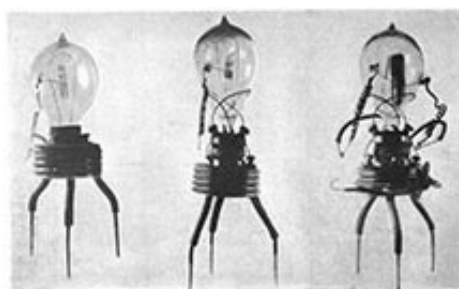


图2 首批弗莱明管原型。

然而，所谓的无线电之父李·德·福雷斯特 (Lee de Forest) 捡起这种技术，意识到了其巨大的潜力。通过在灯丝和加热板之间插入帘栅极，他不仅可以整流信号，还能控制加热板中的电流量。这就实现了放大。尽管有证据表明，他并不理解其三极管的工作原理，但他确实意识到了其巨大的潜力，并尽力发挥这一发明的优势，不但将其作为一项技术，同时也作为与马可尼的发明类似的一种增值服务。通过建立各种企业，德·福雷斯特尝试制造和销售他的真空管，并建立了与马可尼类似的无线网络。然而，这些企业注定要失败，并不是因为技术不好，而是因为德·福雷斯特的商业伙伴往往不够诚实，而且常常让他独自为别人的错误承担责任。最后，德·福雷斯特不得不卖掉自己发明的权利，让其他人享受该发明带来的利润。

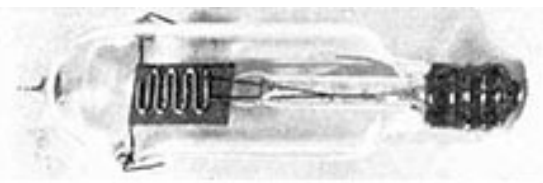


图3. 第一个德·福雷斯特音频三极管。

埃德温·阿姆斯特朗 (Edwin Armstrong) 是早期率先认识到真空管各种可能性的人之一。他还在上高中的时候，家里一位朋友就送了一个德·福雷斯特三极管给他玩。阿姆斯特朗已经获得了无线技术专家的声誉，还在家里建了自己的无线电台，他很快就想到办法，知道如何利用该装置开发出更好的接收器。在大学期间，他继续开发这项技术，并开发出了再生式接收器，与当时所有无线电台采用的无源系统相比，该接收器具有卓越的性能。

大卫·沙诺夫 (David Sarnoff) 是美国马可尼公司的高级人物。与马可尼本人长期建立的合作关系，专注的敬业精神，使他在公司快速崛起。刚开始时，沙诺夫就在AMC跑跑腿，在马可尼一次访美时，偶然遇到了马可尼。沙诺夫给马可尼留下了深刻印象，马可尼为他在公司的发展创造了条件，最终，沙诺夫先后成为AMC和RCA的高级领导。在参观纽约工程实验室时，他偶然遇到了阿姆斯特朗。得益于阿姆斯特朗渊博的无线技术知识及其再生式接收器的强大功能，二人建立起了长期的职业合作关系和个人关系。

第一次世界大战爆发时，阿姆斯特朗感到责任的召唤，应征入伍。但当时，他已经享有无线技术专家的声誉，因而没有被派往作战岗位，而是被派往法国，为各地的作战军种检修和安装无线电台。他的职责使他使用设备、实验室和各种技术，还能附带地继续从事研究活动。在1918年初的一次空袭中，他获得一系列发现，使他合成了超外差接收器。整个1918年，他全力发展自己的概念，到11月，他与一群亲密的朋友会面，展示了超外差无线电的原型。朋友们印象深刻，敦促他继续开发。到1918年底，战争行将结束，在返回美国之前，阿姆斯特朗于1918年12月30日申请了法国专利。回到美国后，他用了几周时间才从一场疾病中恢复过来，使他推迟了提交美国专利申请。最终，1919年2月8日，他为超外差接收器申请了美国专利。

虽然马可尼在无线技术愿景方面只关注两方电报承载的商业信息，沙诺夫的愿景则要广阔得多——把信号发给多方。开始时，沙诺夫的愿景并未得到广泛认同，但其他人最终意识到，这项新技术提供了一种方法，借助该方法可以轻松实现新闻和娱乐节目的远距离传送，包括传送到美国的农村地区。为了推动实现这一愿景，沙诺夫和他的团队想到一个办法，准备于1921年7月2日广播Dempsey与Carpentier的拳击比赛。此次广播活动的成功使其他人看到了我们今天所熟知的这种广播无线电的巨大潜力。

然而，当时的真正挑战是技术性的。早期的收音机很难使用，并且功能不佳。阿姆斯特朗、沙诺夫和美国无线电公司的故事就从这里继续下去。通过之前发展的关系和RCA获得的专利，包括超外差接收器专利，无线电技术已经大大简化，能实现便携，人人都可轻松使用。从技术角度来看，超外差架构是这一成就的关键，时至今日，也是基本如此。



图4. 埃德温·阿姆斯特朗 (Edwin Armstrong) 和妻子马里昂 (Marion) 带着第一台便携式收音机度蜜月。

检波器

无线电必须通过某种方式，产生承载着有意义的信息的输出信号。在早期，这就是在接收环形天线中产生的共振火花。人们很快就意识到，需要用一种更敏感的方式，把辐射能转换成有意义的信号。早期的技术存在很大的局限性，通常利用多种属性，包括化学、机械和电气等属性。

最开始时，使用的首批检波器中有一款被称为金属屑检波器，这款检波器是以一个名叫爱德华·布兰里 (Édouard Branly) 的法国人的发现为基础开发的。该金属屑检波器由两块金属板构成，金属板之间的间距很小，注入一定量的金属粉。当射频信号到达金属板时，金属粉会吸附到金属板上，使电路闭合。这种方式对检波非常有效，但是，一旦射频信号撤离，金属粉会继续吸附在金属板上。为解决这个问题，安排了某种敲击器，用于敲击装置侧面，强制去除金属板上的金属粉。由于这个原因，这种原始检波器虽然有效，但使用起来却非常笨重。尽管如此，到了1907年，人们还在使用这种检波器。



图5. 金属屑检波器。

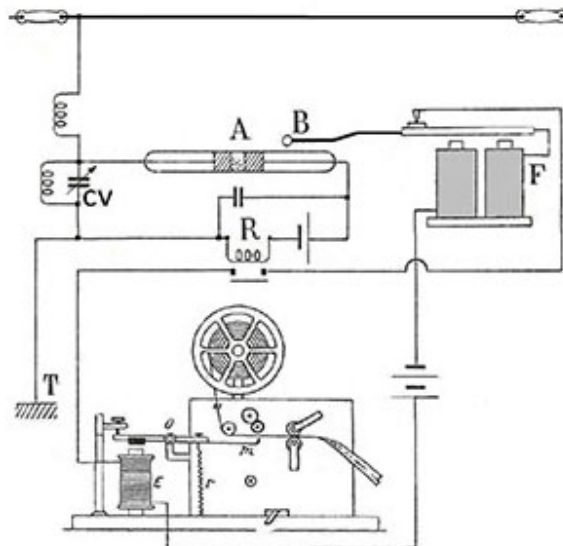


图6. 金属屑接收器原理图。²

一种更实用的解决方案是电解检波器。这种装置由浸入硫酸或硝酸溶液的一条超细铂丝组成。用电池将该电路偏置到电解点。这会在铂丝表面上形成气泡，使电流下降。如果射频电流耦合到该电路中，它将调制电解点并使电流随耦合射频信号的强弱变化。这项技术由费森登 (Fessenden) 开发，1903年至1913年间被人们广泛使用。德•福雷斯特基于这种技术开发了一种变体，被称为应答器，由浸入过氧化铅溶液中的两块金属板构成。

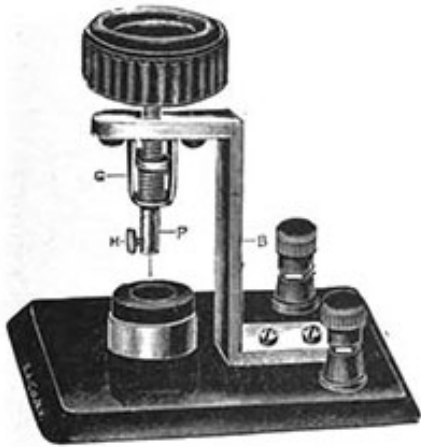


图7. 电解检波器。

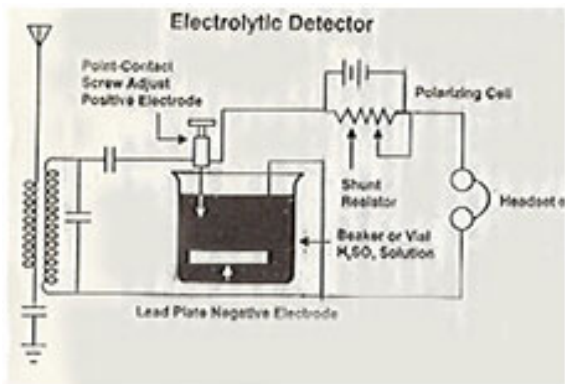


图8. 电解无线电接收器。

马可尼更喜欢被称为磁检波器的另一种方案。这些装置被用户亲切地称为玛吉。它们的工作原理是，形成一个无端钢丝环，使钢丝环呈圆形旋转的同时借助永磁体使其磁化。钢丝磁化部分通过与天线相连的线圈。该线圈中的射频场根据存在的接收信号电平对钢丝去磁。然后，通过另一个线圈拾取钢丝磁场的变化，该线圈连接到耳机，耳机负责提供听得见的射频信号。直到1912年，所有马可尼装置都使用这种方案，包括泰坦尼克号上的装置。



图9. 像马可尼那样使用的磁检波器。³

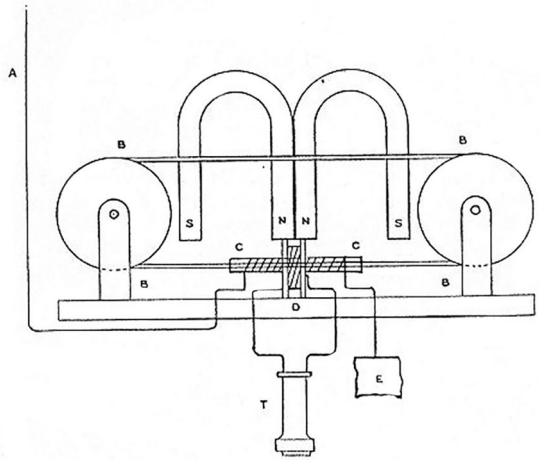


图10. 磁检波器无线电原理图。

另一类常见的检波器是晶体检波器，一直流行到1925年。这类流行器件通常被称为晶须 (cat whisker)，基本上是由各类矿物制成的早期半导体结。典型的矿物包括方铅矿 (PbS)、黄铁矿 (FeS2)、辉钼矿 (MoS2) 和碳化硅 (SiC)。在金属杯制作这些岩石的小样，用细线在岩石上形成点接触。可以移动该点接触，放在岩石的各个位置，以发现最佳工作点。当今的市场上仍有晶体收音机销售；电路与100年前的电路完全相同，只是半导体二极管制成品取代了晶须。晶体检波器的一个优点是，这些装置提供更多的线性检波，这在AM广播发展之初变得非常重要。这使语音通信成为可能，而早期的传输仅由莫尔斯电码发送。



图11. 方铅矿晶须检波器。

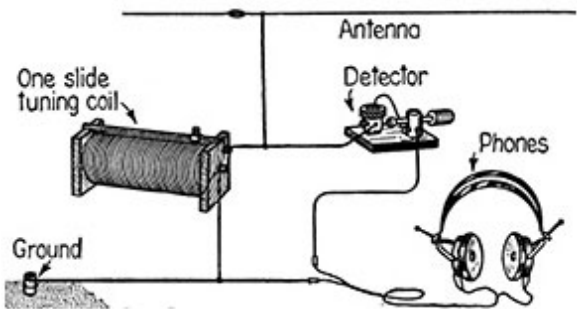


图12. 典型晶体管收音机原理图。⁴

另一类检波器是由一名为马可尼工作的工程师在1904年构建的。约翰•安布罗斯•弗莱明 (John Ambrose Fleming) 发现，通过在爱迪生白炽灯泡上添加一块板，就形成了一个通常被称为整流器或整流阀的装置。马可尼和安布罗斯认为，他们现有的检波方案（通常

为玛吉)的效果优于弗莱明整流阀,于是,他们暂时中止了寻找更好方案的努力,直到1912年之后才重启此项工作。然而,包括德•福雷斯特在内的其他人却看到了该方案的直接价值,他们在弗莱明和马可尼的基础上继续探索,在灯丝与加热板之间添加了一个帘栅极。这项工作成功申请专利,并于1906年正式发布。虽然德•福雷斯特意识到了他的发明对改进收音机的价值,但他无法利用这一点,部分是因为商业伙伴的不端行为,部分是因为针对其专利的各种侵权案件。

第2部分:接收器架构

像德•福雷斯特和阿姆斯特朗这些无线电技术早期的先驱们都明白一个关键点:他们的成功离不开坚固可靠的检波器;早期时,这主要靠无线电报员,他们的技术实力和听力使其成为可能。然而,随着行业的发展,其他方面的重要性也逐渐突显,例如线性度、带宽等。

1912年,为了解决这些问题,德•福雷斯特想出了再生方案以及这种技术可能给接收器带来哪些好处。几乎在同一时间,阿姆斯特朗取得了类似的发现,他指出,如果从加热电路把能量耦合回帘调谐器,当放大器响应在自由振荡之前达到峰值时会产生明显的放大效果。这些发现引发了一场长达数十年的专利纠纷,因为每位发明家都声称首先问世的是自己的发明。

无论如何,再生式接收器的关键优势在于,除了取得非常高的增益水平之外,接收器还有助于将输出连接到扬声器,而不是像之前那样,连接到音频输出很弱的小型耳机上。阿姆斯特朗指出,通过这种安排, he 可以从纽约实验室轻松复制马可尼在爱尔兰的装置,而马可尼通常需要一个中继站来实现跨大西洋的覆盖。得到满意结果后,阿姆斯特朗邀请沙诺夫来到实验室,分享他的发现。借助再生设置,他们整个晚上都在接收远程无线电信号,轻松地接收到了来自西海岸和太平洋的信号。这是检波器技术的一次重大改进。再生式接收器面临的最大挑战是调整反馈以确保正常运行;即使是经验丰富的电报员也很难做好。随着再生式和超再生式无线电的早期型号被投入生产,这一挑战变得非常明显,需要在无线电技术普及之前找到解决办法。

第一次世界大战最终迫使美国参战,阿姆斯特朗在法国领受任务,负责在现场安装无线电装置。这使他有继续研究工作;1918年2月,与法国和英国的同事合作之后,他提出了超外差架构。最终,这种架构解决了许多问题,无需像超再生等以前的架构那样,进行繁琐的调整,而且不会牺牲性能。

整个1918年,阿姆斯特朗继续开发超外差架构,解决了再生和超再生接收器面临的许多难题。这一发展实现了简单易用的无线电,与目前的量产型无线电一致。虽然超外差接收器不是严格意义上的检波器,但它具有增益功能和额外的选项,提供固定中频,不受被监控射频频率影响,有助于提高检波性能和一致性。这样就可以优化检波器,无需担心所需射频频率会导致性能下降,而这正是早期无线电面临的一个巨大挑战,并且继续挑战着今天的无线电设计师,只是频率要高得多而已。即使我们已经继续探索零中频、直接射频采样等新型架构,挑战仍然存在。

E. H. ARMSTRONG.
METHOD OF RECEIVING HIGH FREQUENCY OSCILLATIONS.
APPLICATION FILED FEB. 8, 1919.

1,342,885.

Patented June 8, 1920.

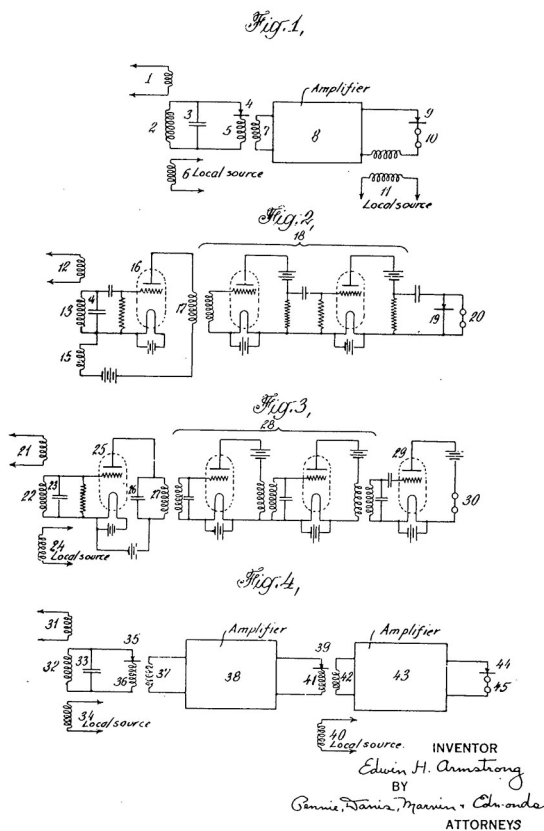


图13. 超外差专利数据。

这些优势巩固了外差架构的重要性,并且今天仍在继续。虽然实施技术已从电子管走向晶体管,再走向集成电路,但该架构仍然是许多现代系统的关键。

除了技术类型的转变以外,无线电架构几乎未发生变化,直到20世纪70年代,通用型DSP和FPGA的出现才改变了这种状况。检波器的功能从线性检波器元件(如二极管、鉴频器和PLL)转向模数转换器,然后是数字信号处理。这为旧技术无法实现的许多功能创造了条件。虽然数据转换器加DSP确实能执行传统的AM和FM解调,但运用数字处理技术可以实现广泛用于数字电视的复杂数字解调,比如美国的HD Radio®以及欧洲和世界其他地区的DAB。

在早期的数字系统中,通常会通过I/Q解调器把中频级转换为基带信号,然后用双低频ADC进行数字化,如图14所示。这些早期的ADC带宽相对较低,因此无线电通常是窄带系统。虽然这些系统可用于低带宽系统,但它们存在正交失配问题,结果会导致镜像抑制问题,必须通过模拟和后来的数字技术进行校正。由于早期系统没有高度集成,因此难以在I/Q之间保持平衡,结果导致镜像误差(正交)。由于必须仔细考虑时间和温度的变化,问题非常复杂。即使在高度集成的系统中,如果不采用某种校正算法,I/Q平衡通常限制在40 dB,或者镜像抑制效果会变差。

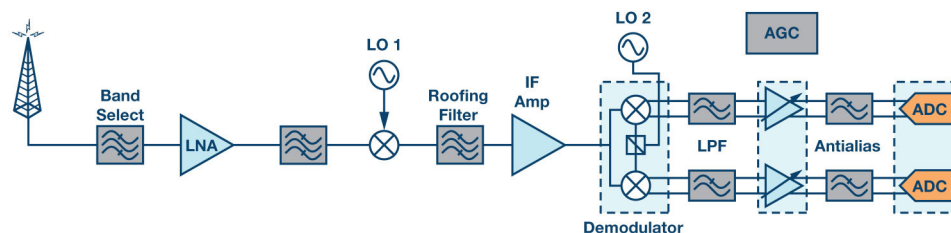


图14. 双通道转换基带采样。

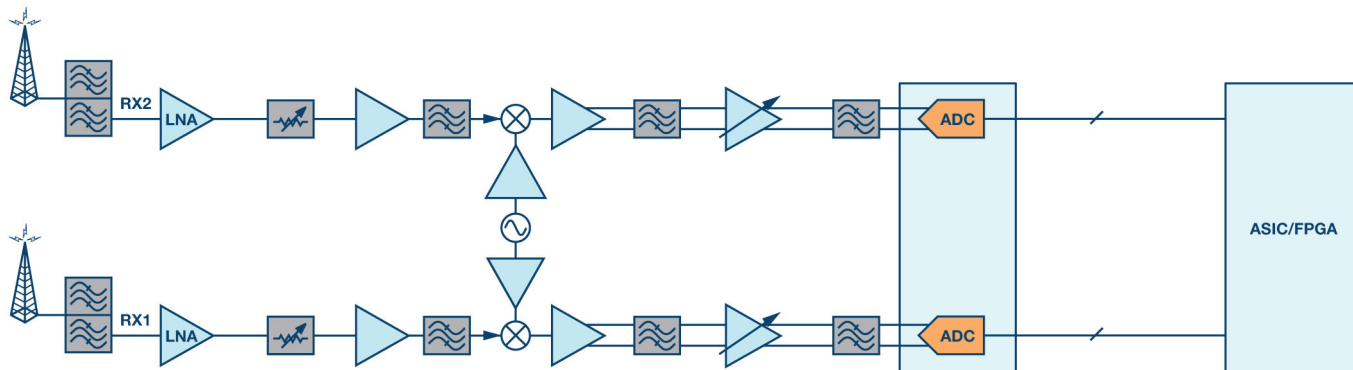


图15. 典型的中频采样架构。

到90年代中期,转换器技术开始得到充分改进,可以用中频采样取代基带I/Q采样。这有几个好处。首先,可以省去解调器和基带转换器对,并用单个ADC代替,从而节省功耗和电路板空间。更重要的是,可以消除与模拟I/Q抽取相关的误差。当然,DSP处理仍然需要复杂数据,但可以通过使用AD6624等数字下变频器(DDC)轻松抽取数据,这些数字下变频器可提供完美的正交性能,不随时间或温度漂移。

最初这些中频采样转换器均为窄带,但到了90年代后期,宽带中频采样转换器开始上市,包括AD9042、AD6645等器件。这些新器件可以采样高达200 MHz的中频频率,并提供高达35 MHz的信号带宽。结果变得非常有意思,许多高性能接收器开始采用中频采样以简化无线电设计并提高性能。该技术的诸多优点之一是,一条接收器信号路径可以处理多个射频载波。⁶这样就可以用一个无线电取代多个模拟窄带无线电,大幅降低许多电信应用的拥有成本。处理多个独立(或从属)射频信号的任何应用都可以从这种类型的架构中受益,从而达到降低成本、减小尺寸和降低复杂性的目的。可以在数字数据流中轻松分出各个射频载波,并根据需要对其进行独立处理。可以使用唯一的信息对每个信号进行不同的调制,也可以扩展信号带宽以增加数据吞吐量。包括ADRF6612和ADRF6655在内的集成混频器技术继续推动着中频采样外差无线电的发展,可与AD9684和AD9694等新型中频采样转换器相结合,实现高度集成的低成本解决方案。这些新型ADC包括数字下变频器(DDC),不仅可以对不需要的频谱进行数字滤波,还可以通过数字手段抽取I/Q分量。

并排比较：过去与现在

阿姆斯特朗的7号专利称：“众所周知，随着接收信号强度的降低，所有检波器都会迅速失去灵敏度，而当高频振荡的强度低于某一点时，检波器的响应会变得十分微弱，无法接收到信号。”阿姆斯特朗声称，随着振幅下降或频率增加，检波器的灵敏度会降低。他和其他人试图找到一种方法，将无线电的有效性扩展到更高频率，提高整体性能。

在三极管、再生管等早期工作的基础上,阿姆斯特朗意识到,可以转换输入频率,使其与现有检波器配合使用时能更高效地工作。另外,可以应用增益,以同时增加射频信号电平和提供给用户的音频信号电平。

图16所示为该专利的示意图之一,“详细说明了如何通过调谐放大器系统,利用[阿姆斯特朗]的方法,其中,21是输入振荡(信号)的来源,真空管整流系统22-23-25转换输入信号和独立外差器件24(本振)的组合振荡。电路26-27被调谐到两个振荡的转换组合(目标混频器积)。多管高频放大器28放大由真空管系统29进行外差处理并检波的所得能量,由电话30指示。”⁷ 通过使用这种方法,阿姆斯特朗得以取得射频能量并将频率转换为可以轻松有效地检波的频率,同时提供充分的放大,使音频电平达到令人舒适的水平。在专利中,他继续指出,可以应用多个外差级,其优点是能提供额外的选项和更高的增益水平,不用担心不受控制的反馈导致振荡——这个问题长期困扰着再生接收器等早期无线电架构。

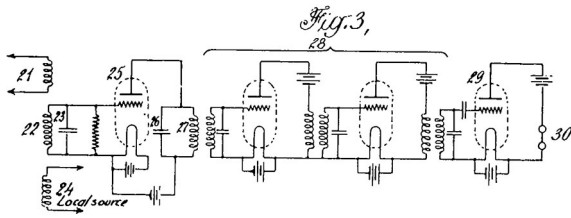


图16. 阿姆斯特朗的超外差示意图。

以下两图有助于我们更好地比较电子管技术与现代实施方案，同时向我们展示了，现代设计与100年前提出的原始设计有多相似。

图17对两个电路进行了并排比较。根据阿姆斯特朗的专利，第一电子管级包括一个真空管整流系统。该第一级利用电子管的整流属性生成典型混频积，把目标信号与L0的混频组合起来。阿姆斯特朗暗示，10 MHz (如图18所示) 为射频，一方面是因为，这超出了他那个时代的检波器可以响应的范围，另一方面是因为，在他开发超外差接收器期间，这对他来说是一个技术挑战。现代接收器通常在混频器之前包括至少一个射频放大器，用于实现低噪声和高灵敏度，如低位信号链所示。这些器件通常采用低噪声FET设计，针对工作频率范围进行了优化。阿姆斯特朗最初申请的专利和现代设计之间唯一的根本区别是放置在混频器之前的独立射频放大器。到二战时，很容易发现一些电子管设计，其采用的前端放大器与今天的FET前端相当。

他暗示称，该输入射频信号可以与大约10.1 MHz的L0组合，在第一级产生0.1 MHz的新单音。我们认为，这是典型混频器的和差积，如图19所示。在图18的管示意图中，L0直接耦合到输入电路中，其中，电子管的非线性行为导致了这些积。这种原创设计带来的一个挑战是，L0会因直接耦合到天线而发生意外辐射。现代设计发生这种

辐射的可能性很低，不过也不是完全不可能，因为如图19所示，L0被耦合到通过前端放大器与输入隔离的混频器中。阿姆斯特朗提出的一个改进方案是，除了检波器以外，利用从板到栅极电路的反馈，也可以将放大器1作为本振，就像他和德•福雷斯特用再生式接收器所做的那样。这样将形成紧凑型的前端功能。在今天的电路中，混频器、本振以及射频和中频放大器通常包含在单个IC中。这些器件被广泛用于从消费需求到工业需求的众多不同应用之中。

对于电子管和单片前端，混频过程会产生射频与L0的和与差。在阿姆斯特朗的案例中，这意味着0.1 MHz和20.1 MHz。此外，通常也会将射频和L0泄漏到输出端。必须滤除混频器形成的、不必要的项，以便接收目标信号。由于检波器的带宽有限，所以，阿姆斯特朗专注于差项，即100 kHz。除了他所包含的谐振LC结构之外，他的2级中频放大器很可能还能对其他项进行一些滤波处理。现代中频放大器也将包括某类中频滤波器。图19所示为基本LC滤波器，但通常要采用某种形式的高Q滤波器。窄带无线电通常在中频级中使用石英或陶瓷滤波器；更宽的频带设计通常根据需要运用SAW或BAW。通常，这种滤波器被称为修平滤波器，用于保护后续级免受强带外信号的影响。

有了经过良好滤波的强大中频信号，阿姆斯特朗现在可以轻松检测到曾经处于其检波器带宽之外的微弱射频信号。现在，在中频下，这些信号能轻松匹配检波器的功能。在采用电子管的情况下，这些信号被整流然后放大，因此可以直接驱动扬声器，至少对于调幅信号是这样。在现代接收器中，模数转换器对模拟中频采样并产生数字等效信号，然后以数字方式进行处理（包括解调）。在音频应用的情况下，该信号可以通过数模转换器转换回模拟信号，以便在必要时驱动扬声器。

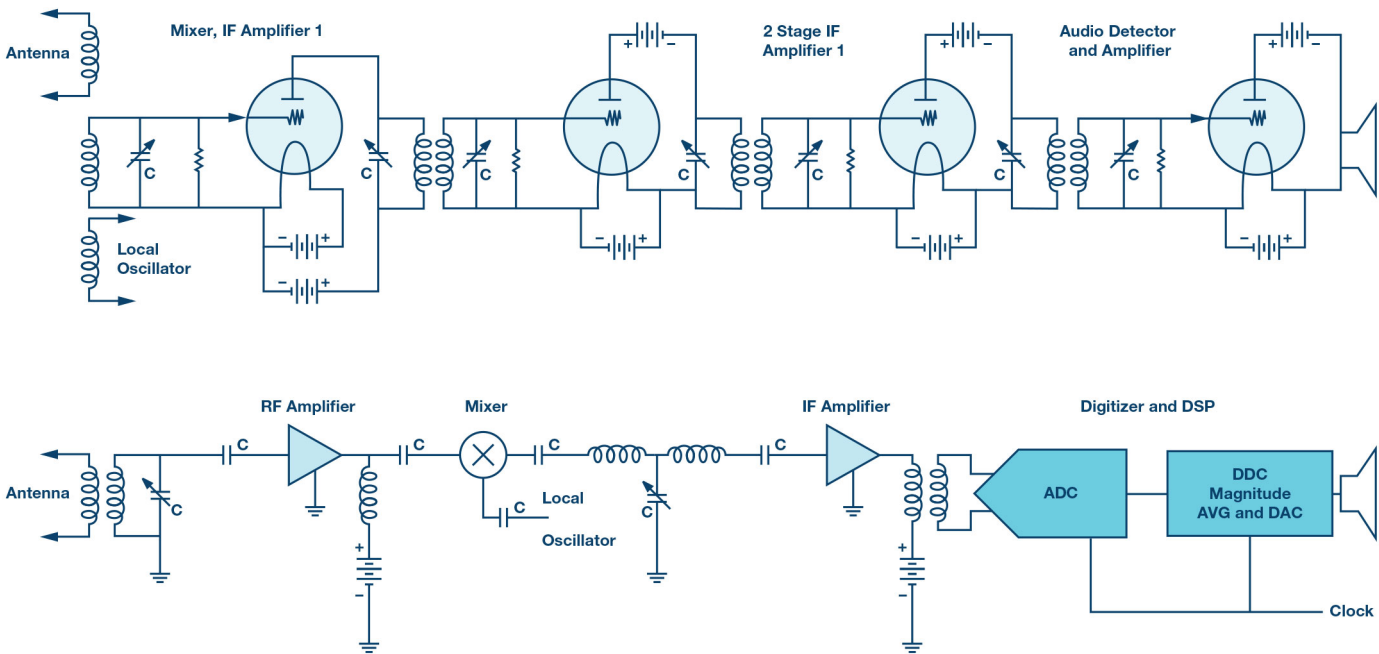
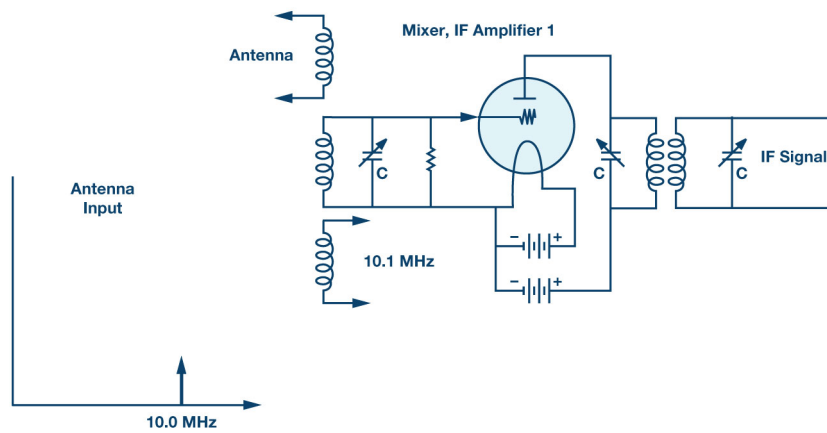
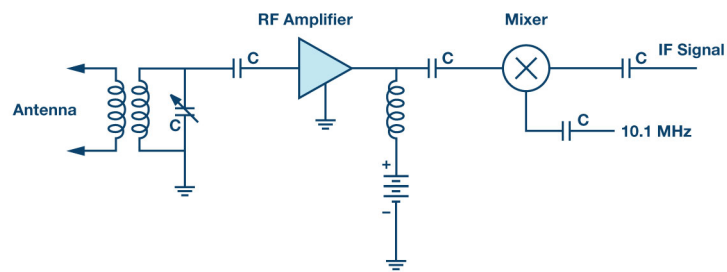


图17. 管与现代超外差设计。



(a)



(b)

图18. (a) 管式前端, (b) 前端。

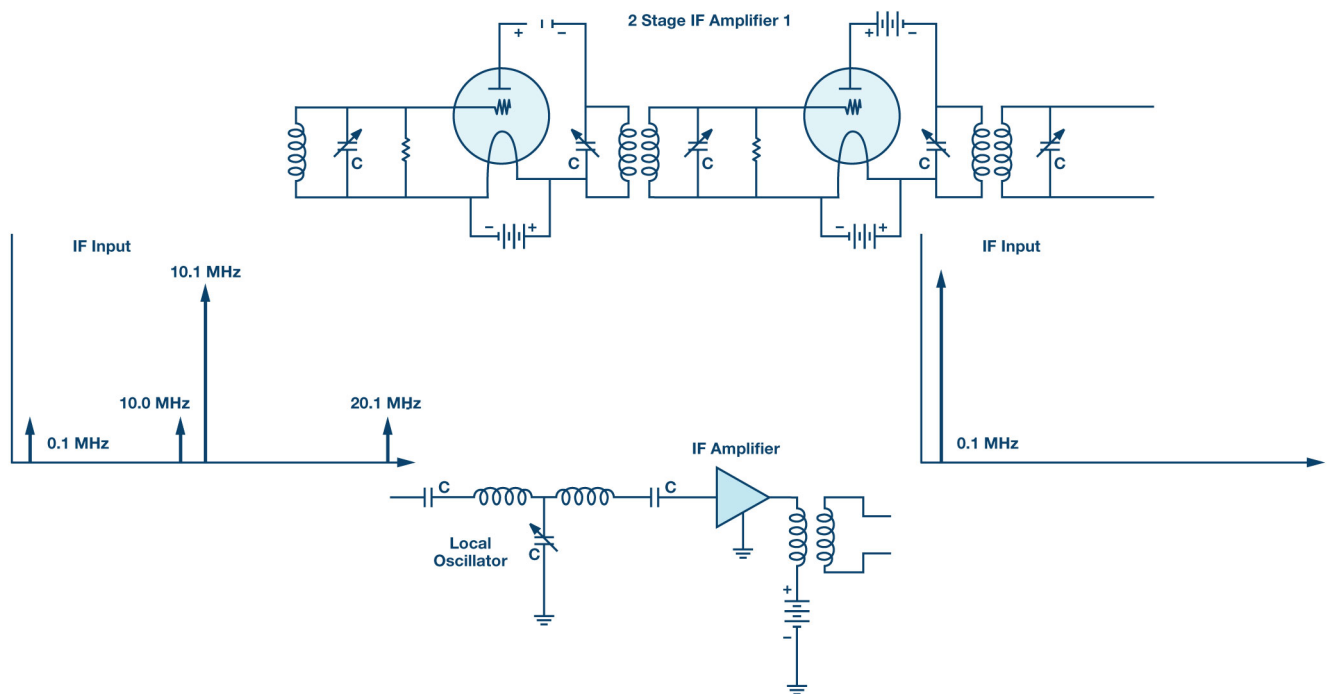


图19. 中频放大器级。

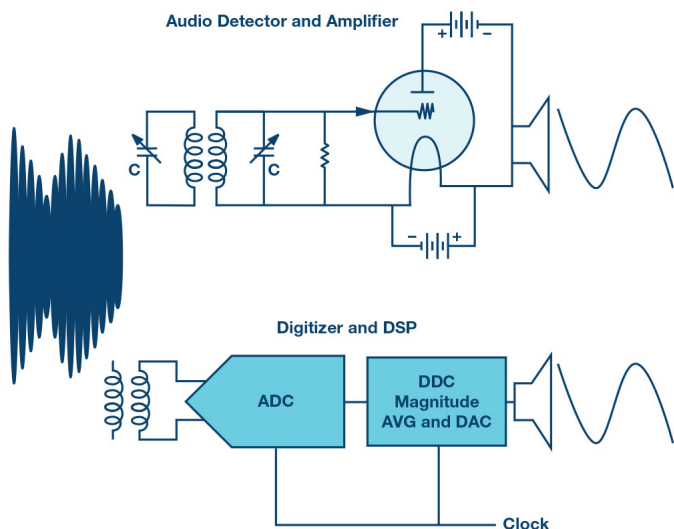


图20. 检波器。

虽然电子管和晶体管版本的无线电都能实现类似的结果，但现代设计具有一系列的优点。值得注意的是，现代设计要小得多，并且功率需求大大降低。虽然便携式电子管无线电从一开始就存在，但晶体管带来了袖珍型无线电。集成电路实现了单芯片无线电，从短距离无线电应用（如AD9371）到高性能应用（如AD9371），应用范围十分广泛。在许多情况下，这同时包括接收器和发射器。

由于单片无线电通常采用模数转换器和数模转换器，因此借助这些无线电很容易实现复杂的调制。管式无线电历来局限于基本调制类型，例如AM和FM。当将数据转换器添加到无线电中时，单片无线电通常就是这样做的，就可以通过数字技术引入新的调制形式，包括扩频和OFDM，它们是我们每天都离不开的大多数现代通信的核心（数字电视、高清无线电、DAB、手机）。

随着无线电技术的继续演进，将会出现更多进步，可能带来目前无法实现的无线电架构或功能。今天，我们拥有高度集成的中频采样超外差架构和零中频架构。初露端倪的其他架构包括直接射频采样架构，在这一架构下，信号被直接转换为数字信号且无需模拟下变频。随着无线电技术的继续演进，可用选项的数量将会增加。然而，某种形式的外差架构可能会在未来一段时间内与我们相伴。

结论

在超外差无线电的百年发展史上，除了实施技术之外，架构上几乎没有变化。多年来，我们目睹了用于构建无线电的介质的多次变化，我们看到，技术从电子管到晶体管，一直发展到单片集成电路。这些变化带来了各种可能性，在无线电发展初期的先驱眼中，这些不过是白日梦，但我们的日常生活却与这些可能性紧密地联系在一起。

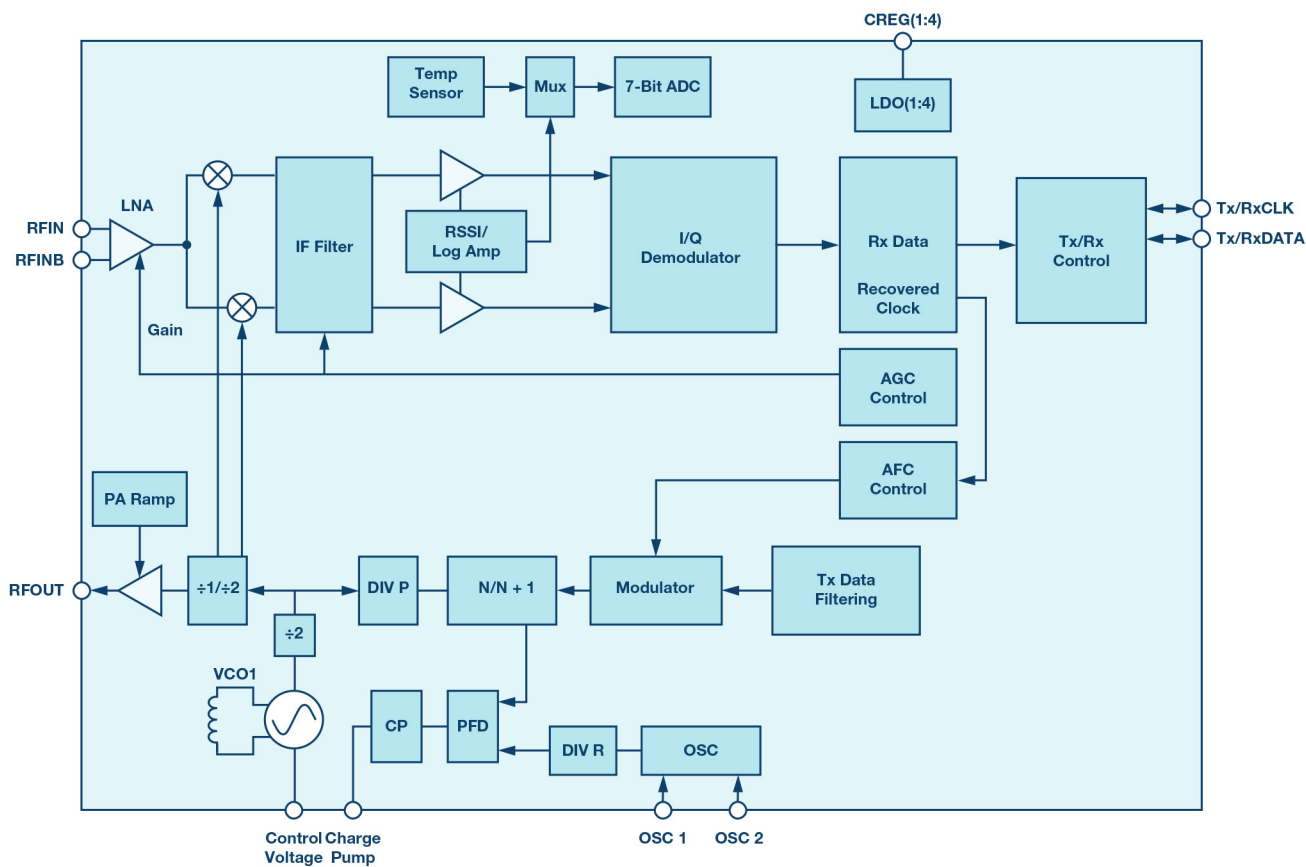


图21. ADF7021短距离无线（简化版）。

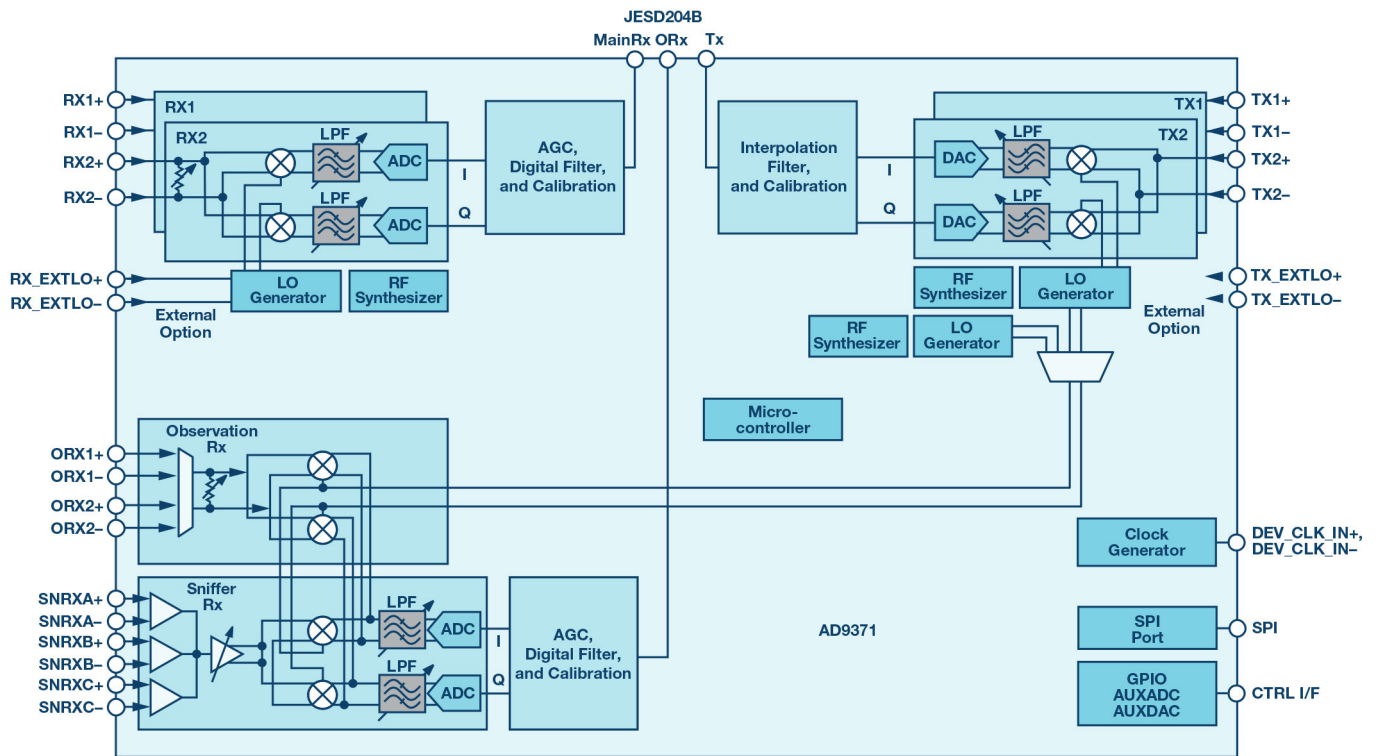


图22. AD9371 ZIF收发器。

使这成为可能的关键因素之一是在当今的无线电技术中由高速ADC实现的检波器。过去几年在数据转换器和其他技术方面的改进带来了我们的互联世界，这正在改变着我们的日常生活和现代社会的结构。令人兴奋的是，这项核心技术正在不断发展，将继续带来当今可能尚不为人所知的新型无线解决方案。就像阿姆斯特朗和利维 (Levy) 的发明为过去100年带来巨大潜力一样，在接下来的100年中，下一代无线技术定将当仁不让，造就无尽可能。

参考文献

- ¹ Tom Lewis, *空中帝国: 造出无线电的人*. Harper Collins, 1991年。
- ² F1jmm, *Recepteur tube limaille*, 1902年3月。

- ³ Alessandro Nassiri, *Detector magnetico Marconi 1902—Museo scienza e tecnologia Milano*, Museo nazionale scienza e tecnologia Leonardo da, 2012年12月。
- ⁴ JA.Davidson, *晶体无线电*, 2007年9月。
- ⁵ Fred Harris, “复杂时间序列的精确FM检波”, 圣地亚哥州立大学电气与计算机工程系。
- ⁶ Walter Tuttlebee, *软件定义无线电: 赋能技术*, 第4章: 软件定义无线电中的数据转换, Wiley, 2002年。
- ⁷ Edward H. Armstrong, 美国专利1342885, “高频振荡接收方法”, 申请于1919年2月8日提交, 1920年6月8日签发。

Brad Brannon[brad.brannon@analog.com]自北卡罗来纳州立大学毕业至今, 已在ADI公司工作32年。在ADI公司, 他先后在设计、测试、应用和系统工程等领域担任多个职位。Brad撰写过大量论文和应用笔记, 主题涉及数据转换器计时、无线电设计、ADC测试等。目前, Brad负责4G和5G接收架构系统工程的工作。



Brad Brannon

该作者的其它文章:

零中频的优势: PCB尺寸减小50%, 成本降低三分之二
第50卷, 第3期