

# A Low-power Impulse Radio Ultra-wideband CMOS Radio-frequency Transceiver

A dissertation submitted to

ETH ZURICH  
for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

DAVID BARRAS

Dipl. El.-Ing. EPFL

born 17 October 1972

citizen of Chermignon (VS), Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Heinz Jäckel, examiner

Prof. Dr. ChristianENZ, co-examiner

Dr. Walter Hirt, co-examiner

## Abstract

Ultra-Wideband (UWB) is a promising technology for short-range and low-power indoor data communications. The recent interest in this technology was initiated in February 2002 in the United States. The amendment of the spectrum policies by the Federal Communication Commission (FCC) allowed the use of a radio signal occupying a bandwidth in excess of 500 MHz within the frequency range between 3.1 and 10.6 GHz. This opened the way to two main classes of wireless applications: 1) high-speed wireless aiming at transmission rates above 100 Mb/s for multimedia applications, and 2) low-complexity radio systems with high integration level intended for low-power applications such as wireless sensor networks (WSN). This work focuses on the second class of applications. Ultra-Wideband has been recognized as an interesting candidate for small portable devices transmitting data at faster rates and lower power consumption than the existing short-range wireless Standards such as Bluetooth or ZigBee. Following the United States, the Electronic Communications Committee (ECC) in Europe finalized a decision in February 2007, which clearly states that the 6-8.5 GHz frequency range is the preferred band for long-term operation of FCC-like UWB devices.

The goal of this project was the development of a standalone wireless integrated transceiver using the promising Impulse-Radio Ultra-Wideband (IR-UWB) technology. The benefits and the limitations of this technology were first thoroughly investigated. We specified a transceiver that could easily be implemented with the minimum loss of performance with respect to an optimum transceiver. Investigations showed that the main limitation comes from the characteristics of the indoor channel. The latter suffers from the multipath effect that induces fading and inter-symbol interferences. In low-complexity transceivers, where no extensive signal processing can be applied, there is an interest to use the multipath rather than to mitigate it. The principle of “energy-collection” is thus applied to the proposed receiver. The second principle of diversity is based on the use of frequency multiple access (carrier-based IR-UWB). For the class of devices targeted in this work (single antenna), the frequency diversity is also the only diversity strategy for enabling a reliable communication link. If the wireless devices are stationary or seldom moving, time diversity is not a reliable option, while small size rules out spatial diversity (eg. multiple antennas).

The main part of this thesis deals with the development of integrated circuits for an IR-UWB transceiver operating between 3 and 5 GHz. The integrated circuits were all realized using a commercial 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS technology. The heart of the transceiver is a wideband voltage-controlled oscillator (VCO) that can be both used in closed-loop (PLL) or in free-running mode. The latter solution involves a self-calibration procedure using the PLL and a digital-to-analog conversion of the control voltage of the VCO. It yields an accuracy of  $\pm 20$  MHz, which is sufficient to meet the requirements of our transceiver. Several other solutions have also been investigated to generate a carrier-based IR-UWB signalling, such as a simple switched oscillator or a pulse shaping stage at radio-frequencies. Finally, a single-chip transmitter using BFSK modulation and offering three channels between 3.3 and 4.8 GHz is demonstrated.

The RF front-end receiver features a 3-5 GHz UWB LNA, which feeds quadrature mixers for frequency down-conversion. A variable gain amplifier has also been developed specifically for our application. It provides 60 dB of voltage gain over a bandwidth of 180 MHz. This circuit also features an automatic gain control that compensates transmitter-receiver range variations and multipath fading effects. The back-end section consists of a mixed-mode application-specific integrated circuit (ASIC), whose function is to demodulate the down-converted quadrature signal into a bipolar pulsed signal. The resulting analog signal is integrated over a duration of 20-40 ns and converted into a digital signal by means of a 1-bit A/D conversion (comparator). The digital section of the baseband chip also synchronizes on the incoming pulse stream and provides the corresponding digital data. The baseband processor is also able to provide an estimation of the signal-to-noise ratio without any information from the received signal strength. This enables an assessment of the link quality prior any further processing or data storage.

The entire IR-UWB link exhibits a communication range of 10 m at 5 Mb/s in free-space without any error correction nor any other coding schemes. This corresponds to a receiver sensitivity of -83.7 dBm for a bit error rate of  $10^{-2}$ . The power consumption of the entire receiver in tracking mode (after synchronization) at 5 Mb/s reaches 36 mW.

## Résumé

L'Ultra-Wideband (UWB, ou à Ultra-Large Bande, ULB) est une technologie prometteuse pour les communications sans fil à courte distance à l'intérieur des bâtiments. L'intérêt récent porté à cette technologie a été initié aux États-Unis en février 2002. La modification de la régulation concernant les émissions électromagnétiques a permis l'utilisation de signaux radio à large bande ( $> 500$  MHz) sur une plage de fréquence s'étendant de 3.1 à 10.6 GHz. Cette modification a permis l'apparition de deux nouveaux types d'application sans fil: 1) les applications visant des taux de transfert supérieurs à 100 Mb/s (multimédia), et 2) les systèmes radio à complexité réduite, utilisant des hauts niveaux d'intégration et ciblant des applications de réseaux de capteurs à basse consommation (wireless sensor networks, WSN). Ce travail se concentre essentiellement sur cette seconde classe d'applications; l'UWB a été identifié comme une technologie à fort potentiel pour les dispositifs portables de petite taille, délivrant des taux de transfert supérieurs à Bluetooth ou ZigBee, tout en maintenant des niveaux de consommation énergétique plus faibles. En février 2007, l'Europe, par le biais du Comité des Communications Électroniques (ECC), emboîtait le pas aux États-Unis en adoptant une décision concernant l'utilisation de l'UWB dans la Communauté. Cette décision établit clairement que la bande de fréquence qui sera favorisée à long terme pour des applications compatibles avec la FCC devra se situer entre 6 et 8.5 GHz.

Le but de ce projet fût le développement d'un émetteur-récepteur intégré sans fil et autonome, basé sur la technologie UWB à impulsions (IR-UWB). Les avantages et les inconvénients de cette technologie ont tout d'abord été minutieusement étudiés. Le travail s'est concentré sur l'élaboration d'une spécification permettant une intégration facilitée et résultant en un minimum de pertes par rapport à une solution optimale théorique. Les études ont montré que la limitation principale est liée aux caractéristiques du canal de transmission. Ce dernier est en effet affecté par de fortes distorsions issues des multiples chemins de propagation (multipath) et des réflexions de l'onde transmise à l'intérieur des bâtiments. Dans les systèmes à complexité réduite, aucun traitement de signal sophistiqué n'est envisagé. En conséquence, il est préférable de travailler avec les imperfections liées au canal plutôt que de les combattre. Le principe de "collection d'énergie" est donc appliquée au niveau du récepteur; l'idée étant d'accumuler l'énergie reçue

des différents chemins de propagation en intégrant le signal arrivant à l'antenne du récepteur. Le second principe de diversité appliqué dans ce récepteur est basé sur l'utilisation du multiplexage de fréquences. Pour des dispositifs sans fil n'utilisant qu'une seule antenne, la diversité de fréquence est la seule stratégie permettant l'amélioration de la fiabilité de la communication. En effet, pour des applications à faible mobilité, la diversité temporelle n'est pas envisageable, tandis que la taille du récepteur exclut la diversité spatiale (antennes multiples).

La tâche principale a été le développement d'une série de circuits intégrés pour une application sans fil UWB entre 3 et 5 GHz sur la base d'une technologie CMOS 0.18  $\mu\text{m}$ . Le cœur de l'émetteur-récepteur est un oscillateur à large bande contrôlé en tension (VCO). Ce dernier peut être utilisé en boucle fermée (avec une boucle à verrouillage de phase, PLL) ou en oscillation libre. Cette dernière solution implique la mise en œuvre d'une calibration basée sur une PLL et une conversion digitale/analogique de la tension de control du VCO. Cette méthode permet une réduction drastique de la consommation tout en maintenant une précision en fréquence suffisante ( $< \pm 20$  MHz). Plusieurs autres solutions ont été étudiées pour la génération de signaux impulsionnels UWB (oscillateur à démarrage rapide, étage de sortie filtrant). Finalement, un émetteur totalement intégré à modulation de fréquence et offrant trois canaux a été démontré.

Le récepteur de radio-fréquence est quant à lui constitué d'un amplificateur à faible bruit (LNA) alimentant une paire de mélangeurs à quadrature. Un amplificateur à gain variable a également été développé pour la bande de base. Il fournit un gain en tension de 60 dB sur une bande passante de 180 MHz. Ce circuit possède aussi un contrôle de gain automatique compensant les variations de signal. Le traitement final du signal est assurée par un circuit intégré spécifique (ASIC). Sa fonction consiste à démoduler, détecter et convertir le signal analogique en un signal digital (données et synchronisation). De plus, un processeur à faible complexité est capable de fournir une estimation du rapport signal-sur-bruit sans latence et sans connaissance a priori de l'amplitude du signal reçu. Ceci permet l'estimation de la qualité de la liaison avant un traitement additionnel ou un stockage des données.

La liaison ainsi réalisée permet une communication sur une distance de 10 m à un taux de transfert de 5 Mb/s en champ libre sans aucune correction d'erreur ou codage. Ceci correspond à une sensibilité de réception de -83.7 dBm (probabilité d'erreur de  $10^{-2}$ ). La consommation totale du récepteur est de 36 mW.